DEZEMBER 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

▶ NOBELPREISE 2005

▶ Ist das Weltall falsch gestimmt?

▶ Einstein in der Chemie

▶ ESSAY: Gerüchte und Vehler

www.spektrum.de

ANTHROPOLOGIE

Wann begann der Mensch zu denken?

Die Wurzeln unseres Verstandes reichen bis weit in die afrikanische Vorzeit des Homo sapiens



SERIE (TEIL III):

DIE WELT IM JAHR 2050

▶ Globale Gesundheit

▶ Wohlstand für alle?

▶ Gute Luft als Ware

▶ Dennis L. Meadows, Club of Rome

D6179E
13,50 sFr / Luxemburg 8,– €

4 194058 406900 12



Reinhard Breuer
Chefredakteur

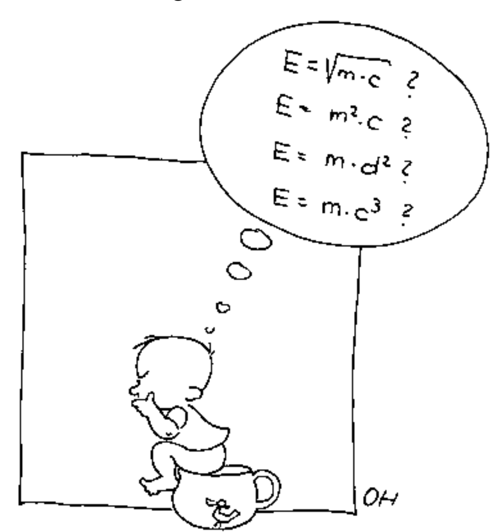
Einsteins Erbe verschenkt?

Alle haben gefeiert: ihn, den größten Physiker des 20. Jahrhunderts, und sich selbst, weil man so großartige Durchbrüche in der Forschung eben feiert, auch wenn sie 100 Jahre her sind. Zugleich lassen sich Kongresse, Ausstellungen und Events zur Imagearbeit für die Physik verwenden, was diese vielleicht auch gut vertragen kann, zumal in Zeiten von Pisa, Sparzwang, Braindrain und Exzellenzförderung.

Auch wir haben kräftig zur Würdigung des *annus mirabilis* beigetragen – mit einem Sonderheft (SdW Spezial 1/2005, »Einstein und die Folgen«) sowie einer vierteiligen Serie. Zum Schluss gehen wir ab S. 90 mit »Einstein in der Chemie« noch einmal auf eher ungewöhnliche Aspekte der Speziellen Relativitätstheorie ein. Hätten Sie zum Beispiel gedacht, dass diese Theorie etwas mit der hübschen Farbe von Gold zu tun hat?

Wichtiger für die Grundlagenforschung in Deutschland ist aber vielleicht die Frage, was »danach« kommt. Schon zu Einsteins hundertstem Geburtstag im Jahr 1979 fragten sich manche, was denn nun davon an Hochschulen in regelmäßige Lehr- und Forschungstätigkeit einfließe. Das Resümee seinerzeit war relativ trostlos – und ist auch heute, 26 Jahre später, kaum besser.

So zieht etwa Hermann Nicolai vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik im »Physik-Journal« (Oktober, S. 3) eine »trübe Bilanz«. Für die Art der Forschung, mit der sich Einstein vor allem befasste, gebe es an keiner der drei großen Berliner Universitäten mehr einen Lehrstuhl, auch die Allgemeine Relativitätstheorie, von Einstein für seine wichtigste Leistung gehalten, sei mit lediglich zwei C4(W3)-Professuren an deutschen Universitäten vom Aussterben bedroht. Kein Wunder, wenn auf Grund auch solcher Defizite der akademische Braindrain, dem Nobelpreis für Thomas Hänsch zum Trotz, offenbar weiterhin anhält – übrigens nicht nur in der Physik. Die neue Bundesregierung bekennt sich erfreulich zu Forschung und Bildung. Wir warten gespannt: auf die nächste Einsteinfeier ebenso wie auf eine erfolgreiche Exzellenz-Initiative.



Aus Fehlern soll man bekanntlich lernen. Doch wie man das am klügsten anstellt, ist oft nicht trivial. Brian Hayes, Mathematiker und Publizist, entführt uns in die Welt seiner ganz persönlichen Irrungen und Wirrungen (S. 116). Manchmal ist es ja wie verhext: Man stößt auf die Lösung eines Problems erst, nachdem man alle nur erdenklichen Fehler gemacht und sich darin verheddert hat. Auch der Amerikaner Hayes leidet mitunter an diesem Syndrom und schildert in seinem Artikel ein amüsantes Beispiel: Über viele Irr- und Umwege lernte er sein Problem – die Computersimulation einer Gerüchteküche – erst richtig kennen und konnte es so schließlich lösen. *Learning by making mistakes!* Ich glaube, auch wir wären gut beraten, unsere Fehler noch besser schätzen zu lernen. Sie sind nicht selten das Beste, was uns zustößt.

DEZEMBER 2005

SPEKTROGRAMM

FORSCHUNG AKTUELL

THEMEN

Titelbild: Wesentlich früher als bisher angenommen trugen Menschen Schmuck und verwendeten Farben
Randy Harris

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet
🔊 Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio



SEITE 30

KOSMOLOGIE

Verstimmtes Universum

Die kosmische Hintergrundstrahlung bestätigt auf glänzende Weise das gängige Modell über Ursprung und Entwicklung des Weltalls. Doch genaue Messungen offenbaren merkwürdige Widersprüche. Ist das Universum fremdartiger als gedacht?





SEITE 76

MEDIZIN

Angriff auf die »Wolfsröte«

Die Gesichtsröte ist nur ein Symptom von »Lupus erythematodes«. Wissenschaftler erproben bereits zielgenaue molekulare Maßnahmen gegen die Autoimmunkrankheit



SERIE: DIE WELT IM JAHR 2050 Teil III

Menschheit am Scheideweg

Die künftigen Wirtschafts-, Gesundheits- und Klimaprobleme sind nicht mehr national zu lösen. Nur als globale Gemeinschaft, die auf Nachhaltigkeit und Solidarität setzt, schaffen wir eine gerechte und lebenswerte Welt

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

TITELTHEMA ANTHROPOLOGIE SEITE 38

Anfänge unseres Verstandes

Abstraktes Denken und künstlerische Kreativität tauchten in Afrika auf, lange bevor der moderne Homo sapiens in Europa auf den Neandertaler traf. Schon vor über 70000 Jahren benutzten Menschen Farben und Perlen in symbolhafter Weise



SEITE 90

RELATIVITÄTSTHEORIE

Einstein in der Chemie

Warum ist Gold gelb und Quecksilber flüssig? Nur die Spezielle Relativitätstheorie kann diese und andere Besonderheiten alltäglicher Objekte erklären

SEITE 116

ESSAY

Gerüchte und Vehler

Fehler sind menschlich, aber meist geniert man sich dafür. Der Mathematiker Brian Hayes jedoch programmiert ein Modell für die Gerüchteküche – und lernt freudig aus seinen Irrtümern

DEZEMBER 2005

REZENSIONEN

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTAR

WISSENSCHAFT IM ...

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



NASA / ESA / STSCI

Relativität im All

In den Weiten des Universums scheint sich selbst Licht langsam auszubreiten. Wo also ließen sich Effekte der Relativitätstheorie besser beobachten als im Weltall?

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT KUNDENNUMMER

Was ist im Entlaubungsmittel Agent Orange?

Natürliche Umweltgifte
Juni 2005

Für gefährlich halte ich die Vorstellung, dass ein Pheromonderivat von *Dermacentor variabilis* im Entlaubungsmittel Agent Orange enthalten sei. Das von Ihnen dargestellte Dichlorphenolderivat wurde als »Phenolat« nach Neuseeland gebracht und dort mit Chloressigsäure über so genannte Di(Tri)Säure unter Alkylierung zu Agent Orange umgekocht. Das mit diversen Dioxinderivaten verunreinigte Agent Orange besteht aus einem annähernd äquivalenten Gemisch aus Butylestern der Di-(Tri)chlorphenoxyessigsäure 2,4(2,4,5).

Ein wissenschaftlich geneigter Leser von SdW könnte sich womöglich fragen, ob eine Agent Orange produzierende amerikanische Hundezecke wegen ihrer eigenen Pheromonfreisetzung nicht schon längst ausgestorben sein oder als Herbizid produzierende C-Waffe vorgesehen sein müsste oder ...

Werner Ivens, Rottenburg

Australien mehrfach zu sehen?

Einsteins Holodeck, Juli 2005

Mich würde interessieren, wie die Visualisierungen in »Einsteins Holodeck« zu Stande gekommen sind. Verbirgt sich darin nicht eine Unsauberkeit? Denn die Darstellung auf S. 62, auf welche Weise man die Oberfläche einer Kugel durch Umlenkung der Lichtstrahlen auf Grund der Gravitation zu sehen bekommen soll, glaube ich so schlichtweg nicht. Sie geht von der Annahme aus, dass von jedem Punkt der Oberfläche nur in wenigen bestimmten Richtungen Lichtstrahlen ausgehen.

Meiner Meinung nach müsste man auf Grund der Ablenkungen in einiger Entfernung Lichtstrahlen aus verschiedenen Richtungen wahrnehmen, die vom selben Punkt der Oberfläche kommen, andersherum Lichtstrahlen aus derselben Richtung von unterschiedlichen Punkten der Oberfläche. Dabei gibt es aber nicht eine bestimmte diskrete Anzahl von Richtungen, sondern innerhalb des scheinbaren Durchmessers des Himmelskörpers unendlich viele, wobei deren Dichte und damit Lichtintensität schwankt. Das Bild der Oberfläche würde also nicht verschoben, sondern unscharf bis zur Unkenntlichkeit.

Uwe Sautter, München

Antwort der Autoren:
In unseren Visualisierungen haben wir für jeden Bildpunkt (9 Millionen bei jeder der gezeigten Abbildungen) einen Lichtstrahl rückwärts zum Objekt berechnet und verfolgt. Dieses so genannte Ray-Tracing wird in der Computergrafik seit Langem benutzt. Im Fall des Neutronensterns, den wir mit der Struktur der Erdoberfläche versehen haben, wird die Bahn des Lichtstrahls von der Bildebene (dem Sensor einer imaginären Kamera) rückwärts verfolgt, bis er auf den Neutronenstern trifft oder an ihm vorbei in den Weiten des Alls verschwindet. Man weiß dann auch, an welcher Stelle und unter welchem Winkel der Lichtstrahl die Sternoberfläche verlassen hat, sodass man dem entsprechenden Bildpunkt den dazugehörigen Farb- und Helligkeitswert geben kann. Der gleiche Punkt auf dem Neutronenstern emittiert natürlich noch viele andere Strahlen, von diesen erreicht aber keiner die Kamera.

Der entscheidende Unterschied zum üblichen Ray-Tracing liegt darin, dass im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie die Lichtbahnen nicht mehr einfache Geraden sind, sondern Nullgeodäten der betrachteten Raumzeit. (Für hohe Geschwindigkeiten muss noch die Lichtlaufzeit berücksichtigt werden.) Als Folge davon kann es bei sehr kompakten Objekten tatsächlich vorkommen, dass mehrere diskrete Lichtstrahlen vom gleichen Objektpunkt die Kamera erreichen. Dies führt dann aber nicht zu einem unscharfen Bild, sondern zu Mehrfachbildern, wie es ja in einigen Abbildungen zu erkennen ist.

Prof. Hanns Ruder,
Dr. Hans-Peter Nollert, Tübingen



INST. FÜR ASTRONOMIE & ASTROPHYSIK, THEORET. ASTROPHYSIK DER UNIV. TÜBINGEN (TAT)

▶ Hätte die Erde die Eigenschaften eines Neutronensterns, wäre ihre gesamte Oberfläche zu sehen, zum Teil sogar mehrfach.



Mehr Zeit für Suche nach Endlager

Die Geister, die ich rief
Kommentar Oktober 2005

Der Autor beklagt, dass das Konzept eines zentralen Zwischenlagers von der Politik beerdigt wurde und der beständig anfallende hochradioaktive Abfall aus den Kernkraftwerken in dezentralen Zwischenlagern landet.

Als die Castor-Transporte nach Gorleben rollten, erregte man sich fürchterlich. Ein riesiges Polizeiaufgebot war zur Begleitung der Transporte erforderlich. Nun werden die abgebrannten Brennelemente an den Standorten der KKW in Castor-Behältern trocken zwischengelagert. Es gibt keine innerstaatlichen Transporte mehr. Das wollte doch die Bevölkerung.

Unbewiesen bleibt allerdings die Behauptung des Autors, die dezentrale Lagerung mache den radioaktiven Abfall gefährlicher. Hätte dann das Bundesamt für Strahlenschutz zwölf dezentrale Lager genehmigen dürfen?

Durch die trockene Zwischenlagerung, bei der Zeiträume von etwa 40 Jahren in Betracht gezogen werden, hat man für die Suche nach einem geeigneten und von der Bevölkerung akzeptierten Endlager mehr Zeit. Das dürfte doch im Interesse aller sein.

Dr. Hartmut Wand, Nussbaumen, Schweiz



Keine irrealen Hoffnungen wecken

Künstliche Netzhaut
Oktober 2005

Wir können hier durchaus von einer »künstlichen Netzhaut« sprechen, doch zu suggerieren, mit diesen Chips sei schon eine Netzhautprothese zu realisieren, ist schlichtweg falsch. Es ist wahr, dass Neuroprothe- ▷

Intelligent Design – wo bleibt die Wissenschaft?

Oktober 2005

Resultat glücklicher Zufälle

Obwohl ich die Argumente der Kreationisten für töricht halte, würde ich die These vom Intelligent Design, so wie sie Kardinal Schönborn vermutlich vertreten hat, aus folgenden Gründen nicht von vornherein verwerfen. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um Argumente der Einmaligkeit. Die Evolutionstheorie benötigt ein Spektrum verschiedener Möglichkeiten, von denen die fitteste selektiert wird.

Die Quantentheorie lehrt uns, dass die physikalische Welt eine zusammenhängende Ganzheit bildet. Diese verschränkte Ganzheit gibt es nur einmal. Leben hängt kritisch von der Gegenwart von Wasser ab. Wasser ist als physikalisches System einmalig. Bewusstsein hängt kritisch von neuronalen Prozessen und der Physik des Blutkreislaufs ab. Dieses Zusammentreffen ist einzigartig.

Darüber hinaus gilt der alte scholastische Spruch: »gratia supponit naturam.« Der glückliche Zufall kann nur dort wirksam werden, wo ihn die Natur zulässt. Die Natur ist nun einmal so, dass sie ihn zulässt. Was wundern wir uns also, dass die Evolution das Resultat glücklicher Zufälle ist?

Dr. med. Walter Rella, Küb, Österreich

Reiz und Reaktion

Die Tatsache, dass gerade Sinnesorgane und mit ihnen das Gehirn als verarbeitendes Organ der ihm zufließenden Daten sich in komplexesten Differenzierungen ergehen, lässt aufmerken: In ihnen spielt der Begriff der Wahrnehmung eine führende Rolle und mit ihm der des Reagierens. Reizungen von außen lassen Abwehrorgane oder sensitive Aufnahmepunkte entstehen, die weitere Ansprache mit Vervollkommnung beantworten.

Wir haben es weder mit blind-zufälliger Anpassung noch mit zielgerichtet planvoller Intelligenz zu tun.

Hans-Joachim Stahnke, Bad Segeberg

Weiterverbreitung bremsen

Veröffentlichungen wie jene von Daniel Dennett sind enorm wichtig, weil sie mithelfen können, die Weiterverbreitung dieser religiös-fundamentalistischen Ansichten zu bremsen. Ich beglückwünsche Ihre Zeitschrift, sich der Auseinandersetzung zu stellen!

Die von Daniel Dennett gegen Schluss seines Artikels genannten Beispiele für Intelligent Design kann ich nicht nachvollziehen. Der mögliche Transport von Lebenskeimen von Planet zu Planet und andere Hypothesen verlangen keinesfalls nach einer steuernden Intelligenz.

Dr. habil. Hansjürg Geiger, Feldbrunnen, Schweiz

Was war vor dem Urknall?

Will man einen Beweis führen oder eine These widerlegen, reicht es nicht, diese zunächst aus dem Zusammenhang und dann in der Luft zu zerreißen. ID ab dem Zeitpunkt des Auftretens von Organismen zu betrachten, gleicht dem Versuch, einen Mord ab dem Auftreffen der Kugel im Herzen des Opfers zu untersuchen.

Die entscheidenden Fragen sind: Was war vor dem Urknall? Wer oder was hat ihn ausgelöst (warum)? Woher stammt die Materie unseres Universums und Letzteres selbst? Darauf wird wohl keiner antworten können. Jedoch sprechen die Indizien dafür, dass kein Zufall ein solch ausgeklügeltes System hat entstehen lassen können. Hier muss ein Designer am Werk gewesen sein, der jenseits aller Dimensionen arbeitet.

Andreas Nemes, Überlingen

Physiker sind schon weiter

Die Parallele zur Physik ist gänzlich misslungen. Gerade theoretische Physiker müssen sich ständig mit neuen, querdenkerischen Modellen auseinander setzen und wissen, dass sie die Frage nach dem »Woher« und »Wohin« letztendlich nicht beantworten können. Ein großer Physiker formulierte es so: »Jedes radikal kritische Denken führt irgendwann in den Bereich der Religion.« Insofern sind Physiker weiter als Biologen.

Johannes Stempfle, Ebersbach

Bewertung der Zufalls-Zwischenprodukte

Die Lösung der Kontroverse Evolution oder Intelligent Design ist die folgende: Reiner Zufall und Selektion allein sind zu wenig für ein sinnvolles Produkt. Die Zufalls-Zwischenprodukte müssen zunächst durch eine potenziell sinnvolle Struktur bewertet werden, bevor sie selektiert werden. Dann aber ist eine Planung nicht notwendig. Oder auf die Biosphäre bezogen: Die Mutation ist blind, die Selektion ist stur, nur die Bewertung durch eine potenziell sinnvolle Umgebung bringt Sinnvolles hervor.

Eduard Wikidal, Katzeldsorf, Österreich

Neo-Thomismus gegen Neo-Darwinismus

Diese Intelligent-Design-Hypothese mit interner Finalität ist eine späte Spielart der scholastischen, von Artistoteles beeinflussten Metaphysik des Thomas von Aquin: Danach sei der Geist das schöpferische Prinzip, das über jedem Materiellen stehe und auch dessen Ordnung präge. Dieser spätmittelalterliche Glaube ist seit 1879 für die spekulative Theologie der Romkirche verbindlich. Deren jüngster Angriff ist also der ideologische Angriff des Neo-Thomismus gegen den Neo-Darwinismus.

Dr . Alfred W. Kumm, Bonn

Oberflächliche Abweisung

Dass diejenigen, die an grundlegendes Schöpferhandeln glauben, nicht einfältiger sind als jene, die ohne Schöpferhandeln auszukommen versuchen, wissen wir aus guten zwischenmenschlichen Begegnungen seit vielen Jahren. Zu beidem braucht es ein erhebliches Maß an Glauben. Deshalb trägt oberflächliche Abweisung eines Schöpfer/Designer-Handelns, das allem Dasein, vom Kosmos über die DNA, zu Grunde liegt, nichts zur Klärung der Grundfragen bei.

Dieter Dahmen, Triefenstein

Interdisziplinäre Gespräche

Überall nur den Zufall walten zu sehen, widerstrebt unserer Erfahrung mit und in der Natur. Hier wird das interdisziplinäre Gespräch zwischen Biologen, Philosophen und Theologen geführt werden müssen.

W. J. Fraidling, Bad Wörishofen

Ein Satz Naturkonstanten

Den Kreationisten kann ganz einfach auf eigenem Grund entgegengetreten werden. Es ist schlicht Gotteslästerung anzunehmen, ein intelligenter, ja allmächtiger Designer würde auf Myriaden von Planeten jeweils Milliarden Lebensformen in armseliger Bürokratenmanier einzeln gestalten. Unfug! Er würde stattdessen sicherlich eher einen Satz netter Naturkonstanten schaffen, Energie hineingeben, sich am 7. Tag bestimmt nicht zurücklehnen und zufrieden betrachten, wie es sich entwickelt.

Prof. Dietrich H. Nies, Halle/Saale

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com

▷ sen zum Sehen entwickelt werden und die ersten Pilotexperimente in den USA und Belgien bei Patienten ein Sehen einfachster Muster in einer Testumgebung ermöglichten.

Auch ist wahr, dass in Deutschland innerhalb der nächsten Monate klinische Studien an den ersten blinden Probanden durchgeführt werden. Neuromorphe Chips werden dabei noch nicht eingesetzt.

Die Herausforderung bei einer neuro-technischen Schnittstelle besteht heutzutage nicht vorrangig in der Signalverarbeitung. Sie liegt vielmehr darin, eine Vielzahl kleiner neuro-technischer Schnittstellenpunkte, so genannte Elektroden, zwischen technischer Prothese und biologischer Zielstruktur herzustellen, die über einen mehrere Jahrzehnte langen Zeitraum stabil und mit gleich bleibender Funktionalität arbeiten. Die Implantate benötigen Energie, und die Hunderte von Elektroden mit Durchmessern kleiner als ein zehntel Millimeter müssen »verkabelt« werden, damit sie mit der Energie zur Stimulation versorgt werden können. Der Körper ist ein aggressives Medium, in dem die Implantate gut eingepackt werden müssen. All diese Dinge sollte man berücksichtigen, bevor man suggeriert, Mikrochips könnten Körperfunktionen einfach übernehmen.

Prof. Thomas Stieglitz, Freiburg

Fabulieren leichter ohne verräterische Zahlen

Weniger Energie – mehr Gewinn, Oktober 2005

Amory B. Lovins erzählt von Einzelfällen, in denen außergewöhnliche Prozentsätze an Energie eingespart wurden. Sie können nur erreicht werden, wenn die Objekte vorher wider alle Vernunft zusammengebastelt wurden. Er will uns weismachen, dass man ein 370-Quadratmeter-Passivhaus bei minus 44 Grad durch Spielen mit einem Hund heizen kann und dass die Stand-by-Schaltungen bei Computern, Fernsehern etwa in amerikanischen, fast durchwegs klimatisierten Haushalten 5 Prozent des ganzen Haushaltsstroms verschwenden. Autokonstrukteure sind scheinbar völlig unfähig, weil sie das von ihm skizzierte 2-Liter-Auto nicht bauen. Schließlich träumt er von einem Wohngebiet, welches im Umkreis von 5 Gehminuten alles Nötige bietet. Da wäre vor lauter Versorgungseinrichtungen kaum Platz für Wohnungen, und Kundschaft gäbe es schon gar nicht. Überhaupt hat Lovins in der zweiten Hälfte des Artikels gemerkt, dass es sich ohne verräterische Zahlenangaben viel leichter fabulieren lässt.

Adolf Stuhl, Wien

Nur korrekte Angaben sind dienlich

Weniger Energie – mehr Gewinn, Oktober 2005

Selbstverständlich kann Geld gespart und das Klima in die richtige Richtung beeinflusst werden, wenn weniger Öl in Motoren oder Heizungen verbrannt wird.

Aber der Autor des Berichts erweist der Förderung der erneuerbaren Energien Wind und Sonne einen denkbar schlechten Dienst, wenn er glaubt, mit falschen oder irreführenden Angaben der Sache dienen zu können.

Sachlichkeit an Stelle von Wunschträumen würde der Lösung der anstehenden Energie- und Umweltprobleme dienen.

Werner Pflanzer-Hässig, Zürich

Abgehobene Spekulation

Leben mit neun Milliarden Menschen, Oktober 2005

Prof. Cohen spekuliert merkwürdig abgehoben über die umweltverträgliche Bevölkerungsstärke der Menschheit. Er kolportiert Zahlen von 1 Milliarde bis 1000 Milliarden. Er braucht sich nur mal in der Welt von heute umzuschauen, um dann problemlos konstatieren zu können, dass 6,5 Milliarden Menschen nicht zuträglich sind.

Der Bevölkerungsdruck treibt die 6,5 Milliarden zum Krieg gegen die Umwelt und gegeneinander. Dabei ist 6,5 Milliarden keine politische Zahl für fiktive Menschen, sondern eine konkrete für real existierende Menschen. Man darf also mit Fug und Recht feststellen, dass die auskömmliche Zahl für Letztere unter 6,5 Milliarden liegt.

Dr. Wilfried Müller, Unterföhring

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 8114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Corinna Gilley, Volkmar Hirantner, Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Kayser, Claus-Peter Sesin.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

SPEKTROGRAMM

PALÄONTOLOGIE

Dinosaurier flog als Doppeldecker

■ *Microraptor gui* sorgte für Aufsehen, als er vor zwei Jahren erstmals beschrieben wurde. Denn im Unterschied zu anderen gefiederten Sauriern trug er nicht nur an den vorderen, sondern auch an den hinteren Gliedmaßen Federn. Damals glaubte man noch, er sei mit zwei hintereinander angeordneten Flügelpaaren im Gleitflug von Baum zu Baum geschwebt. Doch nun behaupten Sankar Chatterjee von der Texas Tech University in Lubbock und Jack Templin, ehemaliger Direktor des Labors für Aerodynamik beim Nationalen Forschungsrat Kanadas, der Saurier habe seine Beine aus anatomischen Gründen gar nicht in die dafür nötige Orientierung bringen können. Vielmehr dürfte er sie wie alle Saurier und heutigen Vögel einfach angewinkelt unter dem Körper gehalten haben. In diesem Fall aber bildeten die Federn daran ein zweites Flügelpaar unter dem an den Armen. Der Vogelvorfahr, der vor knapp 130 Millionen Jahren lebte, flog somit als Doppeldecker. Dadurch erreichte er, wie die beiden Forscher berechneten, eine große aerodynamische Stabilität.

Jahrestagung der Geological Society of America, Salt Lake City, 16.–19. 10. 2005



Mit zwei übereinander liegenden Flügelpaaren glitt *Microraptor gui* vor knapp 130 Millionen Jahren durch die Lüfte.

JEFFREY MARTZ / GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA

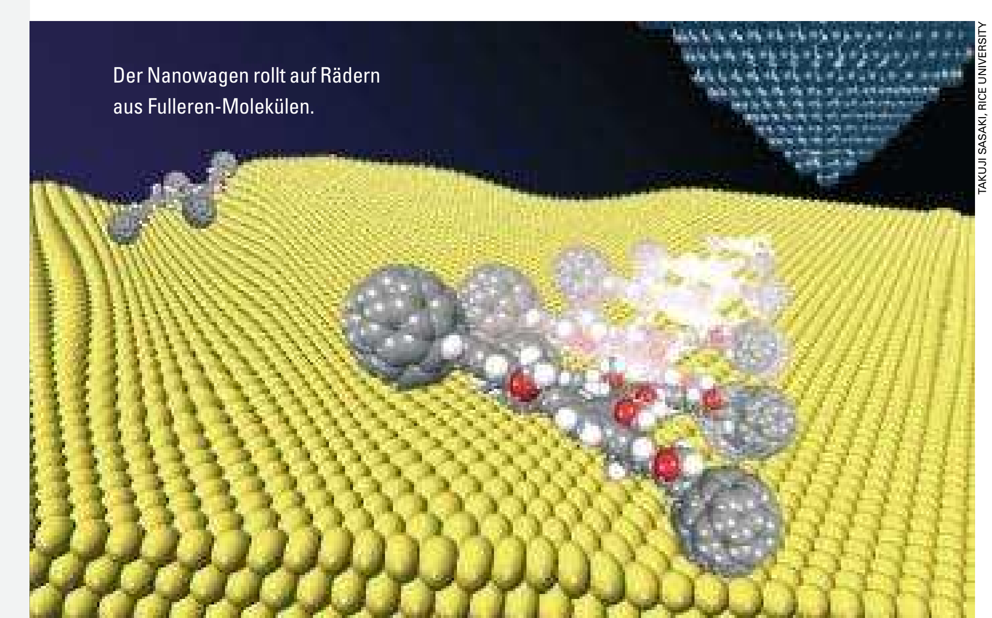
NANOTECHNOLOGIE

Der winzigste Wagen der Welt

■ Als Gestell mit vier Rädern ohne Motor und Lenkrad ist er primitiver als selbst eine Seifenkiste – aber dafür so winzig, dass man ihn auch mit der Lupe vergeblich sucht. 20000 Exemplare nebeneinander wären nur etwa so breit wie ein menschliches Haar. Ein Team um James M. Tour und Kevin F. Kelly von der Rice-Universität in Houston (Texas) bastelte das nur drei bis vier Nanometer messende Gefährt mit Versatzstücken aus dem Molekülbaukasten der Chemie. Rahmen und Achsen bestehen aus stabförmigen Kohlenstoff-Wasserstoffverbindungen (Acetylengruppen im Wechsel mit Benzolringen), und als Räder dienen Fullerene: kugelförmige Moleküle aus 60 Kohlenstoffatomen, die einem Fußball ähneln. Sie anzubringen erwies sich als heikelste Aufgabe, deren Lösung acht Jahre brauchte.

Für Fahrversuche setzten die Forscher den Miniwagen auf eine schräge Goldplatte, die sie auf 200 Grad Celsius erhitzen mussten, damit die Räder nicht elektrostatisch an der Unterlage festklebten. Die Bewegung beobachteten sie mit einem Rastertunnelmikroskop. Dabei zeigte sich, dass der Wagen wirklich rollte und nicht einfach rutschte; denn er fuhr überwiegend vor- und nicht seitwärts. Außerdem stießen Tour und Kelly das Gefährt mit der Spitze des Tunnelmikroskops an. Auch dabei ließ es sich viel besser in Fahrtrichtung schubsen als senkrecht dazu. Nun arbeiten die Chemie- und Computerexperten an einem Antrieb mit Licht und einem Nano-LKW, der auch Lasten befördern kann.

Nano Letters, in Druck. DOI 10.1021/nl051915k



Der Nanowagen rollt auf Rädern aus Fulleren-Molekülen.

TAKUJI SASAKI, RICE UNIVERSITY

ARCHÄOLOGIE

Steinzeit-Spagetti aus China

Wer Spagetti hört, denkt an Italien. Kein anderes Land verfügt über ein reicheres Sortiment an Teigwaren. Aber wurde die Pasta auch dort erfunden? Offenbar nicht. Die ersten Nudeln kamen vielmehr im Reich der Mitte auf den Tisch. Das behaupten Forscher um Houyuan Lu von der chinesischen Akademie der Wissenschaften, die im Nordwesten Chinas einen Tontopf mit etwa 4000 Jahre alten Spagetti entdeckt haben. Das Gefäß lag umgedreht unter einer drei Meter hohen Schicht aus Schwemmsedimenten. Etwa drei Millimeter dick, fünfzig Zentimeter lang und von gelber Farbe seien die steinzeitlichen Nudeln gewesen, berichten die Forscher. Damit ähnelten sie nicht nur der weltbekannten italienischen Spezialität, sondern auch den heute noch in China gern verzehrten La-Mian-Nudeln.



MAOLIN YE, CHINESISCHE AKADEMIE FÜR SOZIALWISSENSCHAFTEN, PEKING

Rund 4000 Jahre alt sind diese Nudeln, die bei Ausgrabungen im Nordwesten Chinas zu Tage kamen.

Seit etwa 2000 Jahren stehen Teigwaren in verschiedenen Erdteilen auf dem Speiseplan. Doch ihre Herkunft lag bisher im Dunkeln. Nun kann China sie zur langen Reihe seiner Erfindungen hinzufügen. Im Gegensatz zu echten Spagetti bestanden die steinzeitlichen Chinanudeln allerdings nicht aus Weizen, sondern aus Hirse. Dass sie sich so lange gehalten haben, ist den idealen Bedingungen an ihrem Fundort zu verdanken: der Ausgrabungsstätte Lajia. Dort hat ein Erdbeben oder eine Flutkatastrophe einst eine Siedlung verschüttet und dabei die prähistorischen Teigwaren unter Luftabschluss konserviert.

Nature, 13. 10. 2005, S. 967

ASTRONOMIE

Sterngeburten am Rand des Abgrunds

Was lange vermutet worden war, hat ein internationales Team um Ralf Bender von der Universitäts-Sternwarte München jetzt bestätigt. Im Zentrum des Andromedanebels, unserer Nachbargalaxie, befindet sich ein Schwarzes Loch. Dort konzentrieren sich nach den neuen Analysen 140 Millionen Sonnenmassen – dreimal so viel wie bisher vermutet – in einem Volumen mit einem Radius von maximal 0,4 Lichtjahren. Eine solche Zusammenballung wäre mit Braunen Zwergen oder ausgebrannten Sternen – der Alternative zum Schwarzen Loch – nicht erreichbar.

Noch interessanter ist eine weitere Entdeckung der Forscher: In unmittelbarer Nähe der Gravitationsfalle ließ sich mit dem Abbildenden Spektrografen des Hubble-Weltraumteleskops eine Ansammlung von mehr als 400 jungen blauen Sternen auflösen. Sie gruppieren sich zu einer Scheibe mit einem Durchmesser von nur einem Lichtjahr, die mit



NASA / ESA / STSCI, ANN FEILD

Im Zentrum des Andromedanebels gruppieren sich zwei ellipsenförmige Ansammlungen roter Sterne um eine Scheibe aus bläulichen Jungsternen – hier in künstlerischer Darstellung.

Geschwindigkeiten bis zu tausend Kilometer pro Sekunde um das Schwarze Loch rotiert. Der Theorie nach sollten derart schnell bewegte Gase nicht zu Sternen verklumpen können. Doch auch unsere Milchstraße hält sich nicht an diese Vorgabe. Hier kreisen gleichfalls 50 bis 100 Jungsterne um ein zentrales Schwarzes Loch. Offenbar sind die alles verschlingenden Moloche nicht nur Todesengel, sondern auch Geburtshelfer.

Astrophysical Journal, Bd. 631, S. 280

MEDIZIN

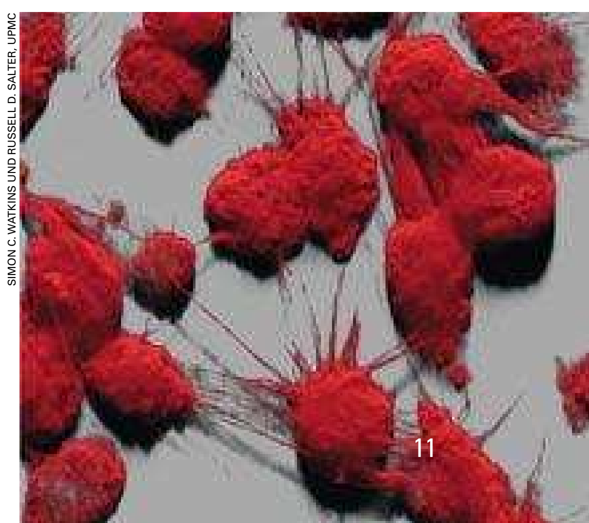
Immunabwehr per Rohrpost

Zellen tauschen auf vielerlei Art Informationen aus. Einen weiteren Mechanismus haben jetzt Simon Watkins und Russell Slater von der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) aufgedeckt. Sie beobachteten, wie Immunzellen über lange Tunnel aus Nanoröhren miteinander kommunizierten. Solche Strukturen hatten andere Forscher bereits letztes Jahr bei Tumorzellen beschrieben, die in Kulturschalen gezüchtet worden waren. Schon damals vermuteten sie darin eine Art interzellulärer Rohrpost. Doch war es ihnen nicht gelungen, den Austausch irgendwelcher Substanzen nachzuweisen.

In der neuen Studie regten die US-Forscher so genannte Fresszellen dazu an, Kalziumionen freizusetzen. Innerhalb weniger Sekunden begannen per Tunnel mit ihnen verbundene Nachbarn daraufhin Scheinfüßchen zu bilden, als ob sie sich Bakterien einverleiben wollten. Da bis zu 75 Nanoröhren von einer Zelle ausgehen, kann ein komplexes Kommunikationsnetz entstehen. Solche Zellverbände dürften dazu dienen, schnell und umfassend auf Eindringlinge zu reagieren. *Immunity, Bd. 23, S. 309*

Mitarbeit: Achim G. Schneider und Stephanie Hügler

Über röhrenartige Verbindungen gelangen Kalziumionen in wenigen Sekunden von Zelle zu Zelle.



SIMON C. WATKINS UND RUSSELL D. SALTER, UPMC

Pyramiden im Meer

Wie riesige spitze Zähne ragen die Inseln des Hawaii-Archipels in diesem Panorama aus dem Ozeanboden. Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum hat dazu Aufnahmen des Satelliten Landsat-7 mit einem digitalen Höhenmodell zu einer grandiosen Ansicht aus der Vogelperspektive kombiniert. Das Meerwasser ist durchscheinend dargestellt und gibt so den Blick auf die mächtigen Fundamente der Vulkaninseln frei, die knapp 5500 Meter unter dem Meeresspiegel entspringen. Diese submarinen Sockel sind steiler als die an Land liegenden Bereiche, weil die dünnflüssige basaltische Lava, die auf Hawaii austritt, unter freiem Himmel weit fließt, im Wasser aber augenblicklich erstarrt.

Ursache des Hawaii-Vulkanismus ist ein »heißer Fleck« im Erdinnern, dessen Magma durch die Krustenplatte dringt, die in nordwestlicher Richtung darüber hinwegdriftet. Darum nimmt das Alter der Inseln von Kauai im Nordwesten zu Big Island im Südosten ab. Dort gibt es noch zwei aktive Vulkane: den 4170 Meter hohen Mauna Loa (vorne links) und den niedrigeren Kilauea südöstlich davon. Der Mauna Kea im Nordosten von Big Island ist mit 4205 Metern der höchste Gipfel von Hawaii. Vom Meeresboden aus gerechnet, überragt er mit 9700 Metern sogar den Mt. Everest. Das Bild stammt aus dem Buch »Berge aus dem All«, das gerade bei Frederking & Thaler erschienen ist.





NOBELPREIS FÜR MEDIZIN

Überlebenskünstler im Magen

Mit dem Nachweis, dass ein Bakterium Hauptverursacher von Magenschleimhautentzündungen und -geschwüren ist, machten zwei australische Wissenschaftler diese oft chronischen Leiden heilbar. Dafür erhielten sie nun den Medizin-Nobelpreis.

Von Achim G. Schneider

Liebe geht bekanntlich durch den Magen. Bei Barry Marshall galt das auch für die Liebe zur Forschung. Mit der Behauptung, das Bakterium *Helicobacter pylori* sei der Urheber von Entzündungen der Magenschleimhaut, hatte der junge Wissenschaftler viel Widerspruch und Spott geerntet. Um seine kritischen Fachkollegen zu überzeugen, entschloss er sich deshalb zu einem Experiment der besonderen Art: Er trank von der Brühe mit dem Erreger, den er zuvor im Reagenzglas angezüchtet hatte.

Nach wenigen Tagen stellte sich die erhoffte Wirkung ein. Marshall wälzte sich mit Unterleibskoliken, erbrach sich und hatte einen fauligen Atem. Kein Zweifel – er litt an einer schweren Gastritis. Der Nobelpreis dürfte ihn nun für das einstige Ungemach entschädigen; denn sein heroischer Selbstversuch trug maßgeblich zur Anerkennung der Hypothese bei, die er und sein Mentor J. Robin Warren aufgestellt hatten.

Warum war es so schwierig, die Wissenschaftsgemeinde zu überzeugen? Bis in die 1980er Jahre herrschte die allgemeine Überzeugung, den widrigen Bedingungen im Magen könne kein Lebewesen trotzen. Denn ein Cocktail aus Salzsäure und Enzymen zersetzt dort vom Rohgemüse zum Rindersteak alles, was hineingelangt – mit der Nahrung einverleibte Bakterien inbegriffen. Dass irgendein Organismus ausgerechnet dieses unwirtliche Milieu als Lebensraum wählen könne, schien ausgeschlossen.

Als Verursacher von Gastritis und Magengeschwüren galten damals Ärger, Stress oder scharf gewürzte Speisen. Diese führten, so die Lehrmeinung, zur vermehrten Ausscheidung von Magensäure, die schließlich die Magenwände angreife. Die Erfahrung schien das zu bestätigen. Gegen Gastritis halfen Medikamente, die einer Übersäuerung des Magens entgegenwirken. Wurden sie abgesetzt, kehrten die Beschwerden zurück.

Auch Warren, Pathologe am Royal Perth Hospital (Australien), war zunächst überrascht, als er 1979 in Gewebeproben von Patienten mit Magengeschwür kleine, gekrümmte Bakterien fand (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 22, und 4/1996, S. 68). Interessanterweise beschränkten sie sich auf Stellen, wo die Magenschleimhaut entzündet war.

Warren stellte den jungen Kollegen Marshall ein, der gemeinsam mit ihm den seltsamen Erreger kultivieren sollte. Doch alle Versuche schlugen fehl. Erst die Osterfeiertage 1982 brachten den Durchbruch. Versehentlich waren die Kulturen länger als gewöhnlich im Brutschrank geblieben. Dies gab *H. pylori* endlich genügend Zeit, zu einer Kolonie heranzuwachsen, bevor die Experimentierenden die Geduld verloren und den Versuch abbrachen.

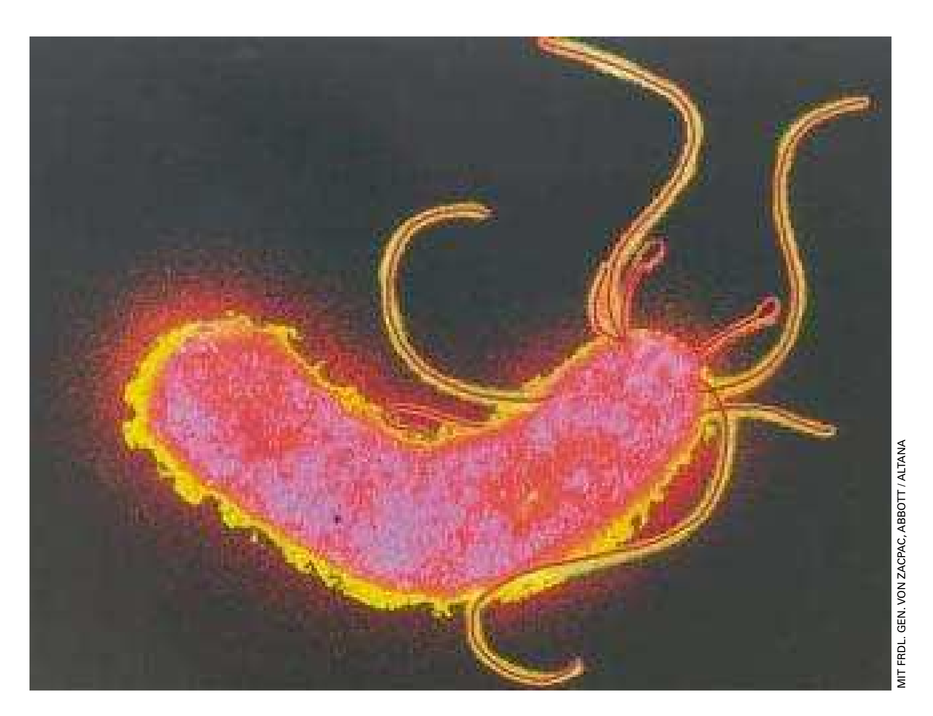
Heroischer Selbstversuch

Die Gegner der Infektionshypothese blieben dennoch skeptisch: Auch wenn *H. pylori* im Magen überleben könne, beweise das noch lange nicht, dass es wirklich die Entzündung verursache. Genauso gut könne sich das Bakterium als Opportunist nachträglich einnisten, wenn die Magenwand durch Entzündung oder Geschwür bereits geschädigt sei. Diesen Einwand widerlegte Marshall schließlich mit seinem spektakulären Selbstversuch.

Heute weiß man, dass vier Fünftel aller Magengeschwüre durch *H. pylori* verursacht werden. Das Gleiche gilt für chronische Gastritis. Geschwüre des Zwölffingerdarms gehen sogar bei neun von zehn Patienten auf das Konto des Bakteriums. Wenn die dauerhaft entzündeten Zellen schließlich entarten, kann es zu einem lebensbedrohlichen Tumor kommen.

Die beiden Australier Barry Marshall (rechts) und J. Robin Warren brachten das Dogma zu Fall, wonach Bakterien in der lebensfeindlichen Magensäure nicht überleben können. Dabei hatten deutsche Wissenschaftler im 19. Jahrhundert *Helicobacter pylori* bereits im Mikroskop beobachtet – eine Erkenntnis, die in Vergessenheit geraten war.

Mit seinen starken Flagellen kann sich *H. pylori* – hier künstlich angefärbt – im Magenschleim fortbewegen und dabei Stellen aufsuchen, an denen das angenehmste Milieu für den Erreger herrscht.



MIT FRDL. GEN. VON ZACPAC, ABBOTT / ALTANA

Marshalls schmerzhafte Magenschleimhautentzündung klang übrigens von selbst wieder ab. Weniger Glück hatte sein neuseeländischer Kollege, der ebenfalls Versuchskaninchen spielte. Drei Jahre dauerte es, bis der Medikamentencocktail gefunden war, der ihn schließlich von dem Eindringling und der durch ihn ausgelösten Gastritis befreite. Darin waren zwei Antibiotika mit einem Wismut-Präparat kombiniert, das den Säuregehalt im Magen verringert.

Fortan konnten Gastritis und Magengeschwüre nicht nur behandelt, sondern gänzlich ausgeheilt werden. Das erlöste viele Erkrankte von einem oft jahrzehntelangen Leiden. Wird heutzutage bei einer Gastritis *H. pylori* diagnostiziert, kann der Patient durch Behandlung mit den drei Wirkstoffen fast stets innerhalb einer Woche den lästigen Untermieter loswerden.

Inzwischen ist auch geklärt, wie es das Bakterium schafft, sich in seiner lebensfeindlichen Umgebung zu behaupten. Um der aggressiven Säure zu entgehen, lebt es vorzugsweise im Magenschleim, welchen die Schleimhautzellen absondern, um sich vor einer Selbstverdauung zu schützen. Ferner kann *H. pylori* mit dem Enzym Urease, das den im Magen reichlich vorhandenen Harnstoff in Ammoniak umwandelt, die Magensäure in seiner unmittelbaren Umgebung neutralisieren. Mit seinen Geißeln ist der Keim zudem mobil und im Stande, Stellen mit für ihn günstigem Milieu aufzusuchen.

Wie man heute weiß, tritt *H. pylori* in verschiedenen Stämmen auf. Einige besonders pathogene können über eine nadelartige Struktur einen Eiweißstoff namens CagA in Schleimhautzellen injizieren und diese so dazu bringen, weniger Magensäure zu produzieren. Die Gefährlichkeit eines Stamms hängt außerdem davon ab, über welche Variante des Proteins VacA er verfügt. Aggressive Formen dieses Toxins fressen Löcher in die Schleimhautzellen und rufen so Entzündungen hervor. Gleichzeitig schalten sie gegen den Erreger gerichtete Immunzellen aus.

Über den Verlauf einer Infektion mit *H. pylori* entscheidet aber auch die genetische Ausstattung des Betroffenen. Wenn die aggressivste Variante des Erregers auf eine besonders empfängliche Person trifft, kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Magengeschwüren, die im schlimmsten Fall zu Magenkrebs führen können.

Ein Schädling mit nützlichen Seiten

H. pylori gehört zu den Erregern mit der größten Verbreitung auf dem Globus. Doch gibt es große regionale Unterschiede in seiner Häufigkeit. In Entwicklungsländern beherbergt fast die gesamte erwachsene Bevölkerung das Bakterium, in Europa dagegen nur noch rund ein Drittel. Der Grund für den Rückgang sind vor allem eine verbesserte Hygiene sowie der verbreitete Einsatz von Antibiotika.

Aber wären wir wirklich alle gesünder, wenn es gelänge, *H. pylori* auszurotten? Wissenschaftler wie Martin J. Blaser von der New-York-Universität bezweifeln das (Spektrum der Wissenschaft 9/2005, S. 82). Zwar begrüßen sie, dass mit dem stetigen Rückgang des Erregers im 20. Jahrhundert auch Magengeschwüre und Magenkrebs seltener geworden sind. Dafür haben jedoch Tumore und andere schwere Erkrankungen der Speiseröhre zugenommen. Dazu zählt insbesondere die Refluxkrankheit, bei der Magensäure in die Speiseröhre aufsteigt.

Tatsächlich erhöhen *H.-pylori*-Stämme, die Magenzellen über Jahrzehnte mit dem CagA-Protein malträtieren, zwar das Risiko, dass diese irgendwann entarten. Doch sie helfen auch gegen Übersäuerung im Verdauungsorgan. Wurde der Erreger mit Antibiotika ausgerottet, kann er Spitzenwerte an Magensäure nicht mehr abfangen. Dies zieht möglicherweise eine Erkrankung der Speiseröhre nach sich. Dafür sprechen Ergebnisse wissenschaftlicher Studien. Demnach erkranken Träger des CagA-Stamms seltener an aggressiven Schleimhautkarzinomen der unteren Speiseröhre und des Mageneingangs als Menschen, die mit einer harmloseren Variante infiziert sind.

Marshall und Warren haben uns Einsichten in das Leben eines Magenbewohners vermittelt, von dessen Existenz wir bis vor 25 Jahren nichts ahnten. Bevor wir aber hingehen und groß angelegte Kampagnen zur Ausrottung des unbequemen Gasts starten, sollten wir ihn erst einmal genauer kennen lernen. Möglicherweise tun wir ja besser daran, uns mit ihm zu arrangieren – indem wir für die Verbreitung von Stämmen sorgen, die mehr Nutzen bringen, als sie Schaden anrichten.

Achim G. Schneider ist promovierter Biologe und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.



Prämierte Überzeugung!



- Sind Sie Leser von einem oder von mehreren unserer Magazine?
- Finden Sie, dass Wissenschaftsmagazine eine Bereicherung in der oftmals oberflächlichen Medienwelt sind?
- Müssen Informationen aus der Forschung für Sie nicht nur aktuell, sondern auch seriös und überprüfbar sein sowie weiterführende Quellen und Links beinhalten?
- Sollen Ihrer Meinung nach viel mehr Leute regelmäßig in Bildung investieren?
- Können sie diese Fragen mit JA beantworten, dann sind SIE die Person, die wir suchen!
- Denn Ihnen dürfte es ein Leichtes sein, eine Freundin oder einen Freund für ein Jahresabo eines unserer Magazine zu begeistern – und sich selbst damit eine attraktive Dankesprämie nach Ihrer Wahl zu sichern:



128 MB USB 1.1-Stick Silver
Der USB-Stick mit Passwortschutz ermöglicht ein bequemes externes Abspeichern von Daten. Lieferung inklusive Verlängerungskabel und Trageband (ab Win 98 und höher).



Universalgutschein BestChoice
Einlösbar bei bis zu 100 Anbietern wie z. B. Amazon, IKEA, Douglas, OBI oder WOM. Umtausch gegen Bargeld ist ausgeschlossen.



Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens
Das Buch von Manfred Spitzer, Direktor der psychiatrischen Uniklinik Ulm, richtet sich an Menschen, die wissen wollen, wie die Lernmaschine in unserem Kopf eigentlich arbeitet und zu nutzen ist.



Einkaufskorb von Reisenthel
Mit wenigen Handgriffen können Sie den mokkafarbenen Einkaufskorb von Reisenthel Platz sparend zusammenfalten. Füllvolumen: 25 Liter, Belastbarkeit: bis 35 Kilogramm. Lieferung ohne Inhalt.

Bestellen Sie mit nebenstehender Karte, telefonisch unter 06221 9126-743, per Fax 06221 9126-751, per E-Mail marketing@spektrum.com oder im Internet

www.spektrum.de/abo

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | D-69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Heidelberg | HRB 8114 | Abonnementsverwaltung: Zenit Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 D-70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Von Sirius zum Laserkamm

Als »Vater der Quantenoptik« erhält Roy J. Glauber die Hälfte des diesjährigen Physik-Nobelpreises. Die andere Hälfte teilen sich John L. Hall und Theodor W. Hänsch für die Entwicklung einer hochgenauen Methode zur Messung von Lichtfrequenzen.

Von Oliver Morsch

Als am 6. Oktober in Harvard der Ig-Nobelpreis – der »Anti-Nobelpreis« für die sinnloseste oder amüsanteste Forschung der jüngsten Zeit – zum 15. Mal vergeben wurde, fehlte bei der Schlusszeremonie ein vertrautes Gesicht. Der Mann hatte über viele Jahre die Papierflieger weggefegt, die traditionsgemäß am Ende der Veranstaltung auf die Bühne geworfen werden. Die Entschuldigung für sein Fernbleiben war allerdings überzeugend: Roy J. Glauber, der fleißige Bühnenkehrer, hatte zwei Tage zuvor den Nobelpreis für Physik gewonnen – den »richtigen«. Wenn er im Dezember zur Preisverleihung nach Stockholm reist, wird er dort seinen amerikanischen Landsmann John L. Hall und den Deutschen Theodor W. Hänsch treffen. Die drei erhielten die begehrte Auszeichnung gemeinsam für Arbeiten, die zu einem besseren Verständnis des Lichts und zu neuartigen optischen Messverfahren geführt haben.

Dass das Nobelkomitee genau ein Jahrhundert nach Albert Einsteins grundlegender Veröffentlichung über die Quantennatur der elektromagnetischen Strahlung drei Experten auf dem Gebiet der Quantenoptik ehrt, mag Zufall sein oder nicht – in jedem Fall ist es sehr passend. Schon mehrmals wurde der Nobelpreis seit seiner Einrichtung im Jahr 1901 für Entdeckungen verliehen, die mit Licht zu tun hatten. Die Themen reichten von der Farbfotografie über Befeuerungsanlagen für Leuchttürme bis hin zur Holografie. Auch Einstein selbst, der gleich mehrere Disziplinen der Physik revolutionierte, bekam den Preis 1921 für seine Arbeiten zum photoelektrischen Effekt (und nicht, wie manche glauben, für seine Relativitätstheorien). Vier Jahre später wurde Glauber geboren, den viele seiner Kollegen und Schüler heute als Vater der Quantenoptik bezeichnen.

Anregung aus dem Weltall

Er hat entscheidend dazu beigetragen, die Idee der Lichtquanten ab 1960 konsequent auszubauen. Dass die Quantentheorie auch elektromagnetische Wellen beschreibt, war zwar seit ihrer Entwicklung in den 1920er Jahren klar, doch in der Praxis spielten die Quanten des Lichts – die Photonen – keine große Rolle. Fast alle optischen Experimente ließen sich mit der von James Clerk Maxwell schon im 19. Jahrhundert entwickelten Theorie des Elektromagnetismus erklären; der Welle-Teilchen-Dualismus blieb weit gehend auf die Physik der Elementarteilchen beschränkt.

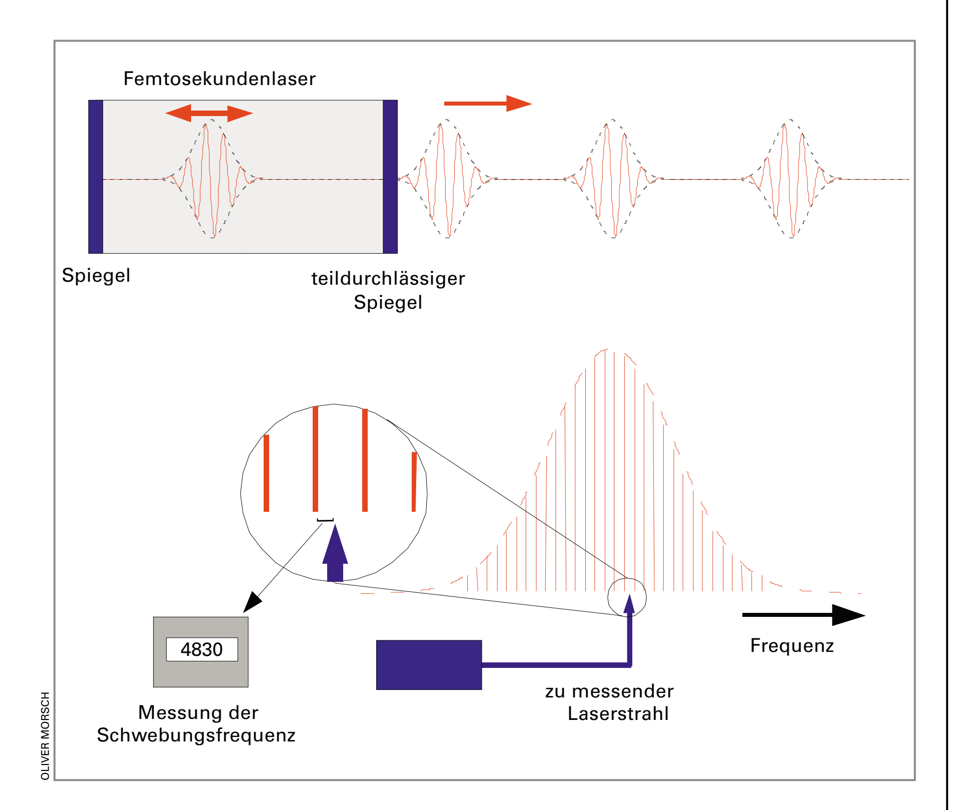
Die Anregung dazu, auch die Teilchennatur des Lichts ernst zu nehmen, kam schließlich in den 1950er Jahren – aus dem Weltall. Um den Durchmesser des »Hundssterns« Sirius zu ermitteln, beobachteten Robert Hanbury Brown und Richard Twiss das von ihm ausgesandte Licht mit zwei Detektoren, die im Abstand von einigen Metern aufgestellt waren. Dabei machten sie eine interessante Entdeckung: Die wenigen Lichtteilchen, die pro Sekunde von Sirius aus die Erde erreichten, ließen die beiden Detektoren bevorzugt zeitgleich anschlagen – es war also wahrscheinlicher, dass Detektor 1 ein Photon nachwies, wenn Detektor 2 zur gleichen Zeit ebenfalls ein Signal gab.

Obwohl sich dieser Effekt auch mit klassischen Wellen erklären ließ, interpretierte Glauber ihn als Beleg für die Quantennatur des Lichts und entwickelte einen Formalismus, mit dem sich die »Kohärenz« der auf die beiden Detektoren treffenden Photonen berechnen ließ. Seine Überzeugung: »Wer (Licht-)Quanten beschreiben will, kommt um die Quantenmechanik nicht herum.«

Während Glauber also die theoretischen Grundlagen der Kohärenz in der

Der Physik-Nobelpreis ging an drei prominente Vertreter der Quantenoptik: Roy J. Glauber (links) von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), John L. Hall (rechts) von der Universität von Colorado in Boulder und Theodor W. Hänsch, der am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und an der Universität München tätig ist.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Ein Femtosekundenlaser (oben) erzeugt extrem kurze Lichtpulse. Deren Frequenzspektrum (unten) besteht aus einer Reihe schmaler Linien mit gleichmäßigem Abstand, welche einen »Kamm« bilden. Um die Frequenz eines anderen Laserstrahls zu messen, muss man lediglich die Schwebungsfrequenz zwischen diesem und einer Linie des Frequenzkamms bestimmen.

Quantenoptik erarbeitete, benutzten Hall und Hänsch – teils unabhängig voneinander, teils in Zusammenarbeit – in den 1990er Jahren kohärente Laserstrahlen dazu, die Frequenz von Licht äußerst genau zu messen. Zuvor war das eine knifflige Sache gewesen. Im Prinzip geht es darum, zu zählen, wie viele Schwingungen ein physikalisches System pro Sekunde macht. Das exakte Stoppen der Zeit ist dabei noch das geringste Problem, dafür kann man eine Atomuhr benutzen. Doch das Abzählen der Lichtschwingungen erweist sich als heikel: Kein elektronischer Schaltkreis ist schnell genug, die mehreren hundert Billionen Oszillationen zu registrieren, die eine Lichtwelle in der Sekunde ausführt.

Das Uhrwerk einer Atomuhr besteht aus Cäsiumatomen, deren Mikrowellenfrequenz in einem bestimmten Zustand als Zeitnormal definiert ist. Eine solche Uhr aber tickt »nur« etwa zehn Milliarden Mal pro Sekunde, also zehntausendmal langsamer, als Licht schwingt. Mit ihr die Frequenz einer Lichtwelle direkt messen zu wollen ähnelt somit dem Versuch, mit einer Sanduhr und einer Strichliste die Drehzahl eines Formel-1-Motors zu ermitteln.

Ein möglicher Ausweg besteht darin, ein »Übersetzungsgetriebe« zwischen der langsamen Atomuhr und den schnellen Lichtschwingungen zu bauen. In den 1980er Jahren wurden zu diesem Zweck so genannte Frequenzketten konstruiert, die ganze Labors ausfüllten. Ihre einzige Aufgabe bestand darin, das Ticken einer Atomuhr über mehrere Zwischenschritte, in denen Frequenzen jeweils vervielfacht wurden, so weit auf Touren zu bringen, dass es schließlich schnell genug war, um mit den Oszillationen des zu messenden Lichts mithalten zu können. Wollte man allerdings eine andere Frequenz messen – zum Beispiel von blauem anstatt von rotem Licht –, so musste man eine völlig neue Kette aufbauen.

Es liegt auf der Hand, dass sich nur wenige Labors eine derart aufwändige und kostspielige Technik leisten konnten. John Hall und Theodor Hänsch beendeten diesen Zustand, indem sie mit nur einem Laser auf einen Schlag mehrere Millionen Frequenzketten entste- ▷

▷ hen ließen, die noch dazu auf einen einzigen Labortisch passten.

Dafür verwendeten sie einen so genannten Femtosekundenlaser. Der sendet nicht den üblichen kontinuierlichen Strahl aus, sondern viele extrem kurze Lichtblitze in rascher Folge (Bild auf S. 21). Solche ultrakurzen Pulse entstehen, wenn viele Strahlen verschiedener Wellenlänge kohärent, also mit einem fixen Abstand zwischen den Wellenbergen und -tälern der einzelnen Schwingungen, überlagert werden. In sehr vereinfachter Form ist dieses Phänomen auch im Alltag als Schwebung bekannt. Sie entsteht, wenn zwei Wellen sich überlagern, und wird zum Beispiel vom Klavierstimmer genutzt: Um Saiten für die gleiche Note in Einklang zu bringen, schlägt er sie zusammen an und ändert die mechanische Spannung der einen so lange, bis das charakteristische Lauter- und Leiserwerden der Schwebung verschwunden ist.

Wie ultrakurze Laserblitze Kämme aus Licht bilden

In dem Laser, den Hall und Hänsch einsetzten, wurden sozusagen Tausende von Saiten gleichzeitig zum Klingen gebracht. Diese überlagerten sich dann zu einer periodischen Folge von extrem kurzen Lichtblitzen, die nur einige billiardstel Sekunden dauerten. Generell gilt: Je mehr Frequenzen ein solches Klanggewirr enthält, desto kürzer sind die Pulse. Die beiden Forscher verwendeten deshalb ein Lasermaterial, das sich in einem sehr breiten Energiebereich anregen ließ und Strahlen vieler Wellenlängen aussandte. Wegen der Resonanzbedingung wurden allerdings nur diejenigen verstärkt, welche stehende Wellen zwischen den Laserspiegeln bilden konnten. Dazu musste ihre Wellenlänge ein ganzzahliger Teiler des Spiegelabstands sein. Ihre Frequenz war demnach ein ganzzahliges Vielfaches einer Grundfrequenz, die einer Wellenlänge entsprach, bei der genau eine Welle zwischen die beiden Spiegel passte.

Das hatte zur Folge, dass das Frequenzspektrum des Pulses aus gleichmäßig angeordneten Linien bestand, deren Abstand gleich der Grundfrequenz war (die mittels einer Atomuhr exakt kontrolliert wurde). Damit ähnelte es einem Kamm, der mit seinen Zacken als optisches Lineal dienen konnte. Die Markierungen auf diesem Lineal waren dabei auf wenige Kilohertz genau bekannt. Um die Frequenz eines anderen Lasers zu messen, mussten die Physiker nun nur noch die sehr viel niedrigere Schwebungsfrequenz (also die Differenz) zwischen seinem Licht und einem der Zacken des Frequenzkamms bestimmen.

Mit dieser Methode schufen Hall und Hänsch ein Übersetzungsgetriebe, das in seiner heutigen, weiterentwickelten Form sogar in einen Schuhkarton passt. Durch einfaches Justieren einiger Spiegel und Prismen kann man es zudem mühelos an die Frequenz der zu messenden Strahlung anpassen. Diejenige von sichtbarem Licht lässt sich so auf 15 Nachkommastellen genau messen, was unter anderem eine Grundvoraussetzung für künftige Generationen von Atomuhren ist und auch bei anderen technischen Anwendungen eine wichtige Rolle spielen wird – zum Beispiel der extrem schnellen Datenübertragung durch Glasfaserkabel.

Theodor Hänsch, der 1986 nach über einem Jahrzehnt aus den USA in die Heimat zurückkehrte und in München Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik wurde, wertet seinen Nobelpreis als Beweis dafür, dass man auch in Deutschland erstklassige Forschung machen kann. Seinen Kollegen war ohnehin schon lange klar, dass »Ted« früher oder später den Nobelpreis bekommen würde. Auf fast jedem Forschungsgebiet, in dem Laser eine Rolle spielen, hatte er in den letzten dreißig Jahre Herausragendes geleistet – von der Laserspektroskopie (für die sein ehemaliger Chef Arthur Schawlow 1981 den Nobelpreis erhielt) über die Laserkühlung (die er in den 1970er Jahren theoretisch voraussagte) bis zur Bose-Einstein-Kondensation (die seinem früheren Schüler Carl Wieman 2001 den Nobelpreis einbrachte).

Als dann aber am 4. Oktober kurz vor Mittag der Anruf aus Stockholm kam, hatte Hänsch zum Feiern gar keine Zeit – wenig später musste er zum Flughafen aufbrechen, um eine seit Langem geplante Reise zu einer Geburtstagsfeier in Kalifornien anzutreten. Passenderweise war der Jubilar niemand Geringerer als der Mann, der Hänsch und seiner Zunft vor gut vierzig Jahren ihr wichtigstes Handwerkszeug bescherte: Charles H. Townes, der Erfinder des Lasers.

Oliver Morsch ist promovierter Physiker und arbeitet an der Universität Pisa über Bose-Einstein-Kondensate und Quantencomputer.

NOBELPREIS FÜR CHEMIE

Quadratisch, praktisch, gut: die Olefin-Metathese

Ein Partnertausch zwischen Kohlenstoffatomen blieb lange rätselhaft. Yves Chauvin entdeckte den Mechanismus; Richard R. Schrock und Robert H. Grubbs entwickelten wirksame Katalysatoren für die Reaktion. Diese Leistungen wurden nun mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Von Michael Groß

Mir sind ein paar merkwürdig verhexte Bauklötze in die Hände gefallen. Vielleicht kommen sie aus der Zauberwelt des Harry Potter, vielleicht auch aus der Erfinderwerkstatt von Ernö Rubik. Jeder hat die Form von zwei aneinander gefügten Würfeln. Wenn ich nun zwei dieser länglichen Klötze, zum Beispiel einen roten und einen gelben, so nebeneinander lege, dass sie von oben betrachtet ein Quadrat bilden, und dann einen Moment nicht hinschaue, habe ich – schwups – auf einmal zwei Bauklötze, die jeweils aus einer roten und einer gelben Hälfte bestehen. Wie ist das möglich? Hexerei oder geniale Erfindung?

Vor ähnlichen Fragen standen organische Chemiker seit den 1950er Jahren, als sie immer öfter eine merkwürdige Beobachtung machten: Unter bestimmten Bedingungen gaben Moleküle, in denen zwei Kohlenstoffatome über eine so genannte Doppelbindung verknüpft waren, diese normalerweise sehr enge und

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Yves Chauvin (Mitte), ehemals Forschungsdirektor am Institut Français du Pétrole in Rueil-Malmaison, erhielt ebenso wie Robert H. Grubbs (links) vom California Institute of Technology in Pasadena und Richard R. Schrock vom Massachusetts Institute of Technology den Chemie-Nobelpreis für grundlegende Arbeiten zur Olefin-Metathese.

stabile Bindung ohne ersichtlichen Grund auf und führten mit anderen solchen Kohlenstoffpaaren einen Partnertausch aus. Nissim Calderon von der Firma Goodyear gab dem Reaktionstyp 1964 den Namen »Metathese« (griechisch für Platzwechsel). Er und andere erkannten schon früh, wie nützlich eine solche Tauschbörse ist, wenn man komplizierte organische Moleküle synthetisieren will. Schließlich erlaubt sie auf direkte und schonende – also umweltfreundliche – Weise das Lösen und Knüpfen von Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen, was sonst meist nur auf komplizierten Umwegen gelingt.

Zwar können bei einem wahllosen Partnerwechsel unter Umständen viele verschiedene Produkte entstehen, die man womöglich gar nicht haben will. Doch dem lässt sich vorbeugen. Zum Beispiel kann man dafür sorgen, dass sich die zur Reaktion gebrachten Doppelbindungen jeweils am Ende einer Kohlenstoffkette befinden. Dann ist eines der Produkte das bei Raumtemperatur gasförmige Ethen ($H_2C{=}CH_2$, früher Äthylen genannt), das sich mühelos aus der Reaktionsmischung entfernen lässt. Das chemische Gleichgewicht reagiert auf diesen Entzug mit dem »Bemühen«, mehr von dem Gas zu produzieren, sodass die eingesetzten Chemikalien vollständig in Ethen und die gewünschte Substanz umgewandelt werden. Befinden sich die beiden Doppelbindungen an den Enden derselben Kette, schließt diese sich zum Ring – ein Syntheseschritt, der bei vielen pharmakologisch relevanten Substanzen wichtig ist.

Doch da man in den 1950er und 1960er Jahren die Einzelheiten der Reaktion nicht verstand, konnte niemand vorhersagen, unter welchen Bedingungen sie besonders vorteilhaft einsetzbar wäre. Gewisse Metallverbindungen schienen die Reaktion zu beschleunigen, aber es war unklar, in welcher Form das Metall vorliegen muss, um eine solche Katalysatorrolle übernehmen zu können.

Im Jahr 1970 brachte Yves Chauvin, der am Institut Français du Pétrole in Rueil-Malmaison arbeitete, endlich Licht in dieses Dunkel. Er erinnerte sich an Arbeiten von Ernst Otto Fischer (Chemie-Nobelpreis 1973), der gezeigt hatte, dass Kohlenstoffatome, die nur zwei statt der üblichen vier Bindungen eingegangen waren, sich mit den beiden übrigen Elektronen an Metallatome oder -ionen anlagern können. Dabei bilden sie so genannte Metallcarbene. Wie der französiche Forscher feststellte, eignen sich dieselben Metalle, die solche Verbindungen mit Kohlenstoff eingehen, auch als Katalysatoren für die Olefin-Metathese. Das brachte ihn auf eine Idee, die ihm nun – 35 Jahre später – den Chemie-Nobelpreis eintrug.

Die Quadratur des Reaktionskreislaufs

Nach Chauvin verhält sich das Metallcarben wie einer unserer magischen Bauklötze und nimmt bereitwillig an dem Bäumchen-wechsel-dich-Spiel teil. Wenn alles optimal läuft, ist es selbst am Ende wieder bei seinem alten Partner gelandet und hat nur die Partnerwechsel der anderen Teilnehmer vermittelt (siehe Kasten auf S. 24).

Die entscheidende Rolle im Molekülkreislauf von Chauvin spielt ein quadratisches Zwischenprodukt, ein so genanntes Metallo-Cyclobutan. Seine Entstehung kann man sich wie eine Figur bei einem Volkstanz vorstellen. Anfangs halten sich die beiden Partner des Ausgangspaars an beiden Händen. Neben ihnen steht ein weiteres Paar. Darin hat das Katalysatormetall den Tauschpartner gefasst. Nun lassen die beiden Paare jeweils eine Hand los und reichen sich diese gegenseitig. Damit schließen sie sich zur quadratischen Vierergruppe zusammen. Gleich darauf aber lösen sie die andere Hand und bilden wieder zwei Paare. In denen sind nun die Partner getauscht.

In der Welt der Moleküle besteht das quadratische Zwischenprodukt – das Metallo-Cyclobutan – aus dem Metall und drei Kohlenstoffatomen. Diese unterscheiden sich durch ihre Bindungspartner an den verbliebenen zwei Armen: Es können einfache Wasserstoffatome oder höchst komplizierte Atomgruppierungen sein. Generell ist das Quadrat extrem reaktionsfreudig und daher kurzlebig – das war einer der Gründe, warum der genaue molekulare Ablauf erst zwei Jahrzehnte nach Entdeckung der Reaktion aufgeklärt wurde.

Chauvins Mechanismus hielt allen experimentellen Tests stand und ist heute allgemein akzeptiert. Mit ihm als Leitmodell konnten sich andere Forscher ▷

Partnertausch beim Ringelreigen

Der komplette Kreislauf einer Metathese ist hier mit Bauklötzen illustriert. Als Katalysator fungiert der Quader M/gelb. Mit ihm steigen wir links in den Kreislauf ein. M/gelb bildet mit einem roten Klotz ein Quadrat, das in die Bestandteile rot/gelb und M/rot zerfällt. Natürlich könnten sich auch die Originalquader zurückbilden, doch würde das zu keiner beobachtbaren Veränderung führen.

Rot/gelb ist eines unserer Reaktionsprodukte, während M/rot – quasi das Alter ego unseres Katalysators – den Reaktionskreislauf fortführt. Es bildet mit einem gelben Klotz – mit einem roten ergäbe sich wiederum keine beobachtbare Veränderung – das unten abgebildete Quadrat. Dieses zerfällt in den ursprünglichen Katalysator M/gelb und ein weiteres Molekül des Reaktionsprodukts rot/gelb. Der Kreislauf ist damit geschlossen. Da unser M-Würfel unverändert aus diesem Zyklus hervorgegangen ist, kann er ihn beliebig oft durchlaufen. Ein Exemplar davon genügt also, um die Reaktion bis zum Gleichgewicht voranzutreiben.

▷ endlich an die systematische Entwicklung wirksamer Katalysatoren für die Olefin-Metathese machen. Zum Beispiel wussten sie jetzt, dass das Metallatom jeweils an eine der beteiligten Molekülhälften gebunden sein muss. Zudem waren nur solche Metalle geeignet, die Carbene bilden können. Trotz dieser Randbedingungen blieb aber noch viel Raum für Kreativität. Als entscheidend erwies sich nämlich, wie das Metallatom mit weiteren Molekülen »eingekleidet« ist.

Übergangsmetalle wie jene, die gewöhnlich für Katalysezwecke benutzt werden, umgeben sich gern mit einer Hülle von molekularen Bindungspartnern, so genannten Liganden. Meist sind es vier bis sechs, die sich in geometrischen Figuren wie Tetra- oder Oktaeder um das Zentralatom gruppieren und mit ihm einen »Komplex« bilden. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Feinabstimmung der chemischen Eigenschaften des Metalls. Das bedeutet auch, dass sie letztendlich über dessen Eignung als Katalysator mitentscheiden.

Auf die Beziehungen kommt es an

So musste Richard R. Schrock erkennen, dass die Carbenkomplexe von Tantal, die er seit Anfang der 1970er Jahre zunächst bei der Firma Dupont und später am Massachusetts Institute of Technology synthetisierte, sämtlich bei der Metathese-Reaktion versagten. Erst 1980 fand er schließlich die richtigen Liganden, die den Metallkomplex zum wirksamen Katalysator machten. Seine damalige Geduld wurde jetzt mit dem Nobelpreis belohnt.

In der Folgezeit ging aus diesem ersten Treffer eine ganze Familie ähnlicher Verbindungen hervor, die alle den Partnertausch rasant beschleunigen. Statt Tantal enthielten sie andere Metalle wie Molybdän oder Wolfram. Seither sind diese Katalysatoren vom Schrock-Typ aus den Forschungslabors nicht mehr wegzudenken. Obwohl die meisten organischen Chemiker sie dort bei Bedarf selbst herstellen, ist mindestens einer auch schon kommerziell erhältlich.

Schrocks Katalysatoren weisen aber einige Schwächen auf, die einer weiteren Ausbreitung vor allem im industriellen Bereich im Wege standen. So sind sie sehr empfindlich gegenüber Luftsauerstoff und Feuchtigkeit, weshalb sie das Arbeiten unter Schutzgas erfordern.

Robert H. Grubbs vom California Institute of Technology in Pasadena, der Dritte im Bund der diesjährigen Chemie-Nobelpreisträger, hatte sich schon in der Anfangszeit der Metathese-Forschung an der Suche nach dem Reaktionsmechanismus beteiligt und einen Vorschlag gemacht, der ein fünfeckiges Zwischenprodukt vorsah. Seine große Stunde kam allerdings erst zwei Jahrzehnte später, als er einen Carbenkomplex des Metalls Ruthenium als neuen Katalysator präsentieren konnte. Dieser war wesentlich robuster als die Komplexe vom Schrock-Typ und eröffnete daher auch ein viel breiteres Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten.

Der erste kommerziell gefertigte Grubbs-Katalysator kam 1995 auf den Markt. Seit 1999 gibt es ein verbessertes Modell. Dank dieser Reaktionsbeschleuniger hat die Olefin-Metathese heute ein sehr weites Anwendungsfeld erobert. Es reicht von der einfachen Polymerisierung kleiner Alkene bis hin zur Synthese hochkomplizierter Pharmawirkstoffe, vom Laborexperiment bis zum großindustriellen Prozess.

Die eingangs erwähnten magischen Bauklötze gibt es nicht wirklich, obwohl es mit moderner Mikroelektronik und ein paar Elektromagneten möglich sein sollte, sie herzustellen. Dagegen hat sich der analoge Vorgang in der Welt der Moleküle dank der Arbeiten der diesjährigen Nobelpreisträger zu einer der nützlichsten Reaktionen der organischen Chemie entwickelt.

Michael Groß ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

Spiele auf Leben und Tod

Die diesjährigen Wirtschafts-Nobelpreisträger, Robert J. Aumann und Thomas C. Schelling, haben das menschliche Verhalten im Spannungsfeld zwischen Konflikt und Kooperation mathematisch modelliert – als Züge in einem Spiel, das oftmals bitterer Ernst ist.

Von Christoph Pöppe

Mit dem Preis der Bank von Schweden für Wirtschaftswissenschaften im Gedenken an Alfred Nobel – so die offizielle Bezeichnung des »uneigentlichen« Nobelpreises – werden in diesem Jahr zwei große alte Männer hauptsächlich für ihr Jugendwerk ausgezeichnet. Robert J. Aumann, geboren 1930 in Frankfurt am Main, zum Mathematiker ausgebildet am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge, seit 1968 Professor an der Hebräischen Universität in Jerusalem und häufiger Gast an zahlreichen Hochschulen der USA, verfasste seine grundlegenden Arbeiten Anfang der 1960er Jahre. Der sieben Jahre ältere Thomas C. Schelling promovierte 1951 an der Harvard-Universität in Cambridge in Wirtschaftswissenschaften, wurde im selben Jahr Berater des US-Präsidenten und war von 1958 bis zu seiner Emeritierung 1990 Professor in Harvard. Sein einflussreiches Hauptwerk »The Strategy of Conflict« datiert von 1960.

Wie kommt es zu dieser selbst für Nobelpreisverhältnisse ungewöhnlich langen Wartezeit? Zwei Erklärungen bieten sich an.

Der Preis wurde für Arbeiten »zum besseren Verständnis von Konflikt und Kooperation mit Hilfe der Spieltheorie« verliehen. Vielleicht hält das Nobelkomitee die Spieltheorie nicht für einen bedeutenden Teil der Wirtschaftswissenschaften und vergibt Preise in dieser Richtung entsprechend sparsam – zuletzt 1994 an John Nash (den Helden des Films »A beautiful Mind«), John C. Harsanyi und Reinhard Selten (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 25). Demnach hätten Aumann und Schelling einfach warten müssen, bis die Spieltheorie wieder an der Reihe war.

Die zweite Erklärung stammt vom Preiskomitee selbst. Die Modelle der Preisträger »mussten sich erst an der Realität bewähren«, und nicht nur das: Sie waren ihrer Zeit so weit voraus, dass die theoretischen Hilfsmittel zu ihrer Verwendung erst noch geschaffen werden mussten, zum Teil von den Preisträgern selbst. In der Tat haben manche ihrer al- ▷

▶ Der Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften ging an Thomas C. Schelling (links), ehemals Professor an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts), und Robert J. Aumann von der Hebräischen Universität in Jerusalem. Beide glänzten durch bahnbrechende Arbeiten im Bereich der Spieltheorie.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Der kalte Krieg motivierte Thomas C. Schelling zu seinen spieltheoretischen Untersuchungen. Damit konnte er Eskalationen durch Drohungen und Gegendrohungen erklären. Eine solche Zuspitzung der Lage ereignete sich 1961 beim Bau der Berliner Mauer, als sich am Checkpoint Charlie amerikanische und russische Panzer gegenüberstanden.

ten Ideen noch Jahrzehnte später durch eine nachträgliche theoretische Fundierung an Glanz zugelegt.

Für einen Spieltheoretiker ist ein Spiel nicht in erster Linie so etwas wie »Mensch ärgere dich nicht«, sondern erstens elementarer, damit es der Analyse zugänglich bleibt, und zweitens ernsthafter, denn es geht um echtes Geld oder auch Wertvolleres.

Die unendlichen Spiele des Robert Aumann

Einen ersten großen Schritt zu einer formalen Spieltheorie tat John Nash mit der Definition des Gleichgewichts, das inzwischen seinen Namen trägt (siehe Kasten rechts). Wie ein physikalisches System strebt auch ein Spiel einem Gleichgewicht zu, aber nur im Kopf der Spieler: Sind sie beim Nachdenken über ein möglichst geschicktes Verhalten, unter Einbeziehung des gegnerischen Verhaltens, bei einem solchen Zustand angekommen, kann kein Spieler sein eigenes Ergebnis (die »Auszahlung«) durch einseitiges Abweichen von diesem Zustand verbessern.

Allerdings ist dieses Ergebnis deswegen noch lange nicht optimal, wie das bekannte Gefangenendilemma in drastischer Weise zeigt. Da die Spieler keine Gelegenheit haben, Vertrauen zu entwickeln und sich seiner würdig zu erweisen, ergibt sich als einziges Nash-Gleichgewicht die beiderseits von Misstrauen geprägte Nichtkooperation. Realitätsnäher ist das ebenfalls wohlbekannte iterierte Gefangenendilemma: Die Spieler spielen immer wieder dasselbe Spiel miteinander. In dieser Situation kann Kooperation sich langfristig lohnen, weil die Gegenseite sie – in ihrem eigenen Interesse – erwidert.

Am Ende der Spielserie ist es aber wieder zweckmäßig, nicht zu kooperieren – man muss ja keine Vergeltung mehr fürchten. Belohnt wird, wer zuerst die Kooperation einstellt, und nach einigem Nachdenken kommen beide Seiten zu dem Schluss, mit dem Kooperieren gar nicht erst anzufangen – jedenfalls, wenn man den Spielern unterstellt, dass sie stets bis zur äußersten Konsequenz denken und außer dem Streben nach möglichst hoher Punktzahl keine Gefühle kennen.

An dieser Stelle führte Aumann das Konzept vom unendlich oft iterierten Spiel ein. Da es kein letztes Spiel mehr gibt, entfällt auch die Erosion des Vertrauens durch das nahende Ende. Das kommt dem Verhalten echter Menschen deutlich näher als ein iteriertes Spiel mit vorher festgelegter Rundenzahl: Wer weiß schon so genau, wann sein letztes Spielstündlein geschlagen hat?

Aumann konnte formal-mathematisch beweisen, was seine Kollegen schon lange für empirisch belegt gehalten hatten und was in der Literatur als »folk theorem« zitiert wird: In jedem unendlich iterierten Spiel gibt es sehr viel mehr Gleichgewichte als in seiner beliebig langen endlichen Version. Als durchschnittliche Auszahlung pro Runde können alle Beträge vorkommen, die in einem gewissen Sinn zwischen den Einträgen in der Auszahlungsmatrix liegen. Die durchschnittliche Auszahlung sinkt für jeden Spieler nicht unter den Wert, den er bei sehr defensivem Spiel (von seinen Gegnern immer das Schlimmste vermuten und danach handeln) erreichen kann, und sie kann insbesondere beim unendlich iterierten Gefangenendilemma den paradiesischen Zustand ewiger Kooperation erreichen.

Indem man etwas Endliches entgegen der Realität als unendlich ansieht, kann also die Theorie zugleich einfacher und realitätsnäher werden. Dieses Rezept hat Aumann gleich noch einmal angewandt, und zwar auf einen Warenmarkt. Dass es in seinem Modell nicht nur unendlich viele Marktteilnehmer gibt, sondern ein Kontinuum (überabzählbar unendlich viele), erscheint zwar auf den ersten Blick befremdlich. Aber nur in diesem Fall hat das Handeln eines Einzelnen

keinen Einfluss auf das Verhalten des Gesamtmarktes (was für Märkte mit endlich oder abzählbar vielen Teilnehmern nur angenähert gilt).

Das wiederum macht die Theorie so handhabbar, dass Aumann die Identität zweier zentraler Konzepte beweisen konnte: Die Verallgemeinerung des Nash-Gleichgewichts für ein Kontinuum von Handelnden ist nicht nur eindeutig bestimmt, sondern fällt mit dem Wettbewerbsgleichgewicht *(competitive equilibrium)* aus der klassischen Markttheorie zusammen. Die Mathematik des überabzählbar Unendlichen, die Maß- und Integrationstheorie, musste Aumann eigens für diese Zwecke ein Stück weiterentwickeln.

Im Vergleich zu den sehr tief gehenden theoretischen Arbeiten Aumanns wirken die Untersuchungen seines Mitpreisträgers wie Fallstudien an einem ziemlich konkreten Beispiel. Thomas Schelling studierte das spannendste und gefährlichste Spiel seiner Zeit: den Rüstungswettlauf.

Thomas Schelling und die Theorie des Wettrüstens

Die formalisierte Version des Spiels heißt in der Literatur »Chicken« – nach dem Zeitvertreib, mit dem angeblich die Jugendlichen in der amerikanischen Kleinstadt den öden Sonntagnachmittag auflockern: Auf der Main Street rasen zwei Autos mit Vollgas aufeinander zu. Wer zuerst ausweicht, gilt als Feigling *(chicken)* und hat verloren. Oder zwei dynamitbeladene Lastwagen begegnen sich auf einer Straße, die nur für einen breit genug ist (siehe Kasten auf S. 28).

Aus dieser völlig symmetrischen Vorgabe ist nicht zu entnehmen, wer von ▷

Nash-Gleichgewicht

Ein Spiel im Sinne der Spieltheorie ist eine sehr formelle Angelegenheit. Die Teilnehmer haben gewisse Handlungsmöglichkeiten zur Auswahl. Aus diesen wählen sie gleichzeitig jeweils eine aus, ohne sich verständigen oder das Verhalten ihrer Mitspieler beobachten zu können. In einer Tabelle (der »Auszahlungsmatrix«) ist für jede mögliche Kombination von Handlungen aufgezeichnet, wie viel jeder Spieler gewinnt oder verliert; und mit dieser Auszahlung ist das Spiel auch schon zu Ende.

In den wenigen Zahlen einer Auszahlungsmatrix kann ein ungeheures Konfliktpotenzial stecken. Das bekannteste Beispiel ist das berühmt-berüchtigte Gefangenendilemma:

A \ *B*	kooperieren	verweigern
kooperieren	(2, 2)	(0, 3)
verweigern	(3, 0)	(1, 1)

Jeder Eintrag der Matrix enthält die Auszahlung für den ersten und den zweiten Spieler, in dieser Reihenfolge. Zum Beispiel besagt der rechte obere Eintrag: Wenn *A* kooperiert und *B* nicht, erhält *A* null Punkte und *B* drei.

Kooperieren ist gut (2 Punkte für jeden), Verweigerung ist besser (3 Punkte), wenn der andere kooperiert. Aber einerlei was der Partner tut: Nicht kooperieren ist besser als kooperieren. Also entscheiden sich beide Spieler für »verweigern« und lassen sich damit die Vorteile der Kooperation entgehen.

Ein Nash-Gleichgewicht ist ein Satz von Strategien (für jeden Spieler eine) mit der Eigenschaft, dass kein Spieler durch einseitiges Abweichen von seiner Strategie einen Vorteil erzielen kann. Eine Strategie ist der Vorsatz eines Spielers, entweder eine bestimmte unter den gebotenen Möglichkeiten zu wählen (reine Strategie) oder diese Wahl vom Ergebnis eines Zufallsexperiments (mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten) abhängig zu machen (gemischte Strategie).

John Nash hat bewiesen, dass es bei Spielen, die durch eine Auszahlungsmatrix nach obigem Muster definiert sind, stets (mindestens) ein Nash-Gleichgewicht gibt. Im Fall des Gefangenendilemmas ist das einzige Nash-Gleichgewicht der unbefriedigende Zustand (verweigern, verweigern).

Wer zuerst ausweicht, hat verloren

Zwei Länder *A* und *B* erheben Anspruch auf eine Provinz (sagen wir Kaschmir). Ein Land, das seine Truppen in Stellung bringt, kann die Provinz kampflos erobern, es sei denn, das andere Land hätte ebenfalls mobilgemacht. In diesem Fall gibt es Krieg. Dieses Szenario wird durch das Spiel »Chicken« (»Feigling«) modelliert, mit der folgenden Auszahlungsmatrix:

A \ B	mobilmachen	nicht mobilmachen
mobilmachen	(0, 0)	(a, c)
nicht mobilmachen	(c, a)	(b, b)

Dabei gilt $a > b > c > 0$: Am schönsten (a) ist es, die Provinz zu besitzen; die Fortdauer des Status quo ist nur die zweitbeste Lösung (b); aber für beide Seiten ist Krieg (0) schlimmer als der Verlust der umstrittenen Provinz (c).

Dieses Spiel hat drei Nash-Gleichgewichte. Davon bestehen zwei, nämlich (a, c) und (c, a), aus reinen Strategien: Einer erobert, und der andere gibt klein bei. Das dritte ist ein gemischtes Gleichgewicht: Jede Partei würfelt und entscheidet sich mit Wahrscheinlichkeit p für eine Mobilmachung. Dabei hat p für beide den gleichen Wert, da die Situation vollkommen symmetrisch ist. Also ist die erwartete Auszahlung bei Mobilmachung $(1-p)\,a$ und bei Nichtmobilmachung $p\,c + (1-p)\,b$. Gleichgewicht besteht dann, wenn diese beiden Werte gleich sind, denn dann hat keine Seite etwas davon, einseitig den Wert von p zu ändern. Daraus ergibt sich eine Gleichung für p mit der Lösung $p = (a-b)/(a-b+c)$.

Eine Friedenspolitik muss zum Ziel haben, p möglichst klein zu machen, denn p^2 ist die Wahrscheinlichkeit für Krieg. Das kann man erreichen, indem man $a-b$ verkleinert, das heißt das Erobern im Vergleich zum Friedenszustand möglichst unattraktiv macht, oder – wirksamer – indem man c vergrößert, sprich dem Verlierer sein zu erwartendes Schicksal versüßt.

Das »Gleichgewicht des Schreckens« (b, b) ist in diesem Modell kein Gleichgewicht! Das geschieht erst dadurch, dass beide Länder zusätzlich die Spieloption erhalten, eine Art Reaktionsautomatik (zum Beispiel die viel diskutierte »Zweitschlagskapazität« aus der Zeit des Wettrüstens) einzurichten oder auch nicht. Wenn Land *A* die Möglichkeit hat, sich darauf festzulegen, genau dann mobilzumachen, wenn auch Land *B* mobilmacht, dann wird *A* von dieser Möglichkeit Gebrauch machen und *B* nicht mobilmachen; das jedenfalls ist ein Nash-Gleichgewicht.

▷ beiden klein beigeben soll. Aber die kleinste Asymmetrie, selbst wenn sie nur in den Köpfen der Beteiligten besteht, lässt die Situation kippen. Schon wenn Spieler *A* sein Leben mehr liebt als Spieler *B* – und sei es auch nur vermeintlich – und *B* das erfährt, hat *A* verloren, denn *B* wird dann die draufgängerische Strategie wählen. Es ist also hilfreich, den anderen über die eigenen Motive zu täuschen. Diese psychologischen Feinheiten kann die Spieltheorie nicht erfassen, ebenso wenig wie man »durch eine rein formale Herleitung beweisen kann, dass ein bestimmter Witz witzig sein muss«, so ein berühmt gewordenes Zitat aus Schellings »Strategy of Conflict«.

Aber von den seltsamen Denk- und Verhaltensweisen des Wettrüstens liegt, wie Schelling demonstrierte, ein erstaunlich hoher Anteil innerhalb der Reichweite der Spieltheorie. So kann sie erklären, warum es für einen Spieler unter Umständen vorteilhaft ist, sich die eigenen Möglichkeiten unwiderruflich zu beschneiden. Der General, der hinter sich die Brücken sprengt, oder der Wahnsinnige, der beim Chicken-Spiel sein Lenkrad in der Geradeausstellung festklemmt, macht seinem Gegenspieler klar, dass er gar nicht mehr klein beigeben kann, lässt diesem daher das Nachgeben als vorteilhafteste Option erscheinen und hat damit gewonnen. Es sei denn, der Gegner wäre ebenfalls wahnsinnig.

Ein weiteres Ergebnis von Schellings Analyse lautet: Vorteilhafter als die Drohung mit der automatischen Vergeltung ist oft die, sich im Konfliktfall »die Kontrolle entgleiten zu lassen«. Drohungen sind umso glaubwürdiger, je weniger sie den Drohenden kosten. Es ist daher eine vorteilhafte Strategie, langsam die Wahrscheinlichkeit eines Kriegs ansteigen zu lassen. Da die andere Seite auf jeder Stufe der Eskalation nachgeben kann, bleiben echte Kriege selten – eine Situation, welche die meisten Kinder perfekt verstehen, wie Schelling bemerkte.

Warum Abrüstungsverhandlungen nur zäh vorankommen

In unlösbar scheinenden Situationen ist es bisweilen hilfreich, das Problem in kleinere Teilprobleme aufzulösen, das heißt aus dem großen Spiel ein iteriertes Spiel mit kleinerem Einsatz pro Runde zu machen. So kann das gegenseitige Misstrauen, das im Gefangenendilemma die Gemeinsamkeit untergräbt, dem Aufbau von Kooperation weichen, wie er im iterierten Gefangenendilemma vorkommt. Das erklärt, warum Abrüstungsverhandlungen unweigerlich langsam vorankommen.

Ob und wenn ja, wie die Militärstrategen Schellings Erkenntnisse genutzt haben, bleibt auch heute noch deren Geheimnis. Ein gewisses Indiz immerhin ist, dass die Nationale Akademie der Wissenschaften der USA Schelling für seine »Verhaltensforschung mit Relevanz für die Verhinderung eines Atomkriegs« eine Auszeichnung verlieh.

Das jüngste größere Werk des Meisters bezieht sich auf Spiele, deren Beteiligte die zwei (oder mehr) Seelen in der Brust ein und desselben Menschen sind. In der Tat: Dass alle Beteiligten das Beste (für sich selbst) wollen, aber das langfristige Wohlergehen dem kurzfristigen Vergnügen opfern, ist typisch nicht nur für das Gefangenendilemma, sondern auch für die guten Vorsätze jedes Menschen: nicht mehr rauchen, mehr Sport treiben, nicht so viel essen und so weiter. So ist es nur konsequent, dass Schelling von 1984 bis 1990 Direktor des Instituts für die Erforschung der Raucherverhaltens an der Harvard-Universität war.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Springers
EINWÜRFE
von Michael Springer

Sex im All

In der Schwerelosigkeit fällt nicht alles leicht.

Bemannte Raumfahrt ist bekanntlich bei Politikern und Sciencefiction-Fans beliebter als unter Astrophysikern. Die hätten das viele Geld lieber für unbemannte Raumsonden oder für die fällige Reparatur des Hubble-Weltraumteleskops. Aber da jetzt sogar die Chinesen zum Mond fliegen wollen, werden sich die reichen Länder gewiss nicht lumpen lassen und ihre bisher etwas lustlos geplanten bemannten Mond- und Marsmissionen forcieren.

Apropos lustlos. Weltraummediziner erforschen zwar längst Verdauungsstörungen, Muskelschwund und Kreislaufschwäche infolge längerer Aufenthalte im All, aber dass Astronauten sexuelle Wesen sind, war bisher kein Thema. Der typische Raumfahrer trägt sekundäre Geschlechtsmerkmale wie Bartwuchs und Geheimratsecken, sieht nur in Ausnahmefällen aus wie eine Frau – sonst hieße es ja beweibte Raumfahrt –, und sämtliche Besatzungsmitglieder sind absolut asexuell.

Dass diese Fiktion im Lauf der dreißig Monate, die man zum Mars und zurück braucht, ziemlich sicher zusammenbrechen wird, ist jetzt doch einigen Fachleuten aufgefallen. Wie die britische Zeitschrift »New Scientist« kürzlich meldete, warnt die National Academy of Sciences der USA in einem Bericht an die Weltraumbehörde Nasa vor erotischen Verwicklungen im All.

Einer der Autoren, der Arzt und Anthropologe Lawrence Palinkas von der University of Southern California in Los Angeles, konnte in antarktischen Forschungsstationen Erfahrungen sammeln. Aus ihnen schließt er, dass sich auch in einem Marsschiff recht stabile sexuelle Bindungen etablieren werden. Dabei kommt es aber mit einiger Wahrscheinlichkeit zu Untreue, Eifersucht, Streit und Trennung; darunter könnte das soziale Leben an Bord zusammenbrechen. Palinkas empfiehlt darum ein spezielles Training der Astronauten, eine Art vorbeugende Paarberatung mit Einzelaussprache und Gruppentherapie.

Die Sexualpsychologin Carol Rinkleib Ellison aus Oakland (Kalifornien) teilt zwar die Sorge, sieht im interplanetaren Liebesleben aber auch Vorteile. Der Alltag während einer monatelangen Mission drohe zur öden Routine zu geraten, die lange Reise durch den lebensfeindlichen Weltraum mache Angst; da könnten sexuelle Aktivitäten oder zumindest Masturbation Trost und Abwechslung bringen.

Ellison rät der Nasa daher, sich mehr um die praktische Seite von Weltraumsex zu kümmern. Raumfahrer stehen unter ständiger gegenseitiger Beobachtung und werden obendrein von der Erde aus kontrolliert. Es fällt nicht jedem leicht, sozusagen öffentlich intim zu werden, während Monitore alle Winkel ausspionieren und Sensoren Atemfrequenz, Puls und Körpertemperatur messen.

Ein weiteres Hindernis vermutet die Sexualforscherin im Fehlen der gewohnten Gravitation: »Wie hat man Sex unter Schwerelosigkeit?«, fragt sie besorgt. Offenbar kennt sie den Film »Solaris« von Andrej Tarkowski nicht. Da zieht sich das Liebespaar in die Bibliothek einer Raumstation zurück, während aus nicht näher erklärten Gründen für einige Zeit die Schwerkraft abgeschaltet wird. Zwischen langsam flatternden Folianten schweben Mann und Frau umschlungen dahin, während Orgelmusik von Bach ertönt.

Vielleicht sollte man sich um die erotische Seite einer hoffentlich nicht nur »bemannten« Raumfahrt keine allzu großen Sorgen machen. Das dicke Ende kommt erst danach: wenn die Marsfahrer nach fast drei Jahren ihre nun wieder bleischweren Leiber ins irdische Bett hieven und sich fragen, wie man damit Sex haben kann.

Michael Springer

Missklänge im Universum

Die »Musik« der kosmischen Hintergrundstrahlung weist merkwürdige Dissonanzen auf. Womöglich ist uns das Universum fremder als bislang vermutet.

Von Glenn D. Starkman und Dominik J. Schwarz

Stellen Sie sich ein überwältigend großes Sinfonieorchester vor, das seit 14 Milliarden Jahren ununterbrochen spielt. Zunächst klingen die Melodien harmonisch. Doch beim genaueren Hinhören fallen einige schräge Töne auf. Merkwürdig: Tuba und Kontrabass spielen sanft eine andere Weise.

Genau diesen Eindruck haben Astrophysiker, wenn sie der »Musik« des Universums lauschen, der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung. Mit ihr können sie die Bedingungen im frühen Kosmos ausloten. Kurz nach dem Urknall traten offenbar in der Energiedichte des Universums zufällige Fluktuationen auf, wahrscheinlich ausgelöst durch Quanteneffekte. Jene Schwankungen blähten sich auf und entwickelten sich schließlich zu den heutigen Galaxienhaufen. Eine Analogie zu gewöhnlichen Schallwellen – das sind Oszillationen der Luftdichte – ist durchaus gerechtfertigt. Der »Klang«, der vor 14 Milliarden Jahren im Universum ertönte, hat sich in die kosmische Hintergrundstrahlung eingeprägt. Was sich heute als räumliche Temperaturabweichung in der Hintergrundstrahlung präsentiert, ist gewissermaßen eine Aufzeichnung dieses Klangs (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 46).

Wie bei einer Schallwelle lassen sich auch die Fluktuationen der Hintergrundstrahlung analysieren, indem wir sie in ihre harmonischen Komponenten zerlegen. Diese einzelnen Sinusschwingungen sind vergleichbar mit reinen Tönen unterschiedlicher Frequenz oder – noch bildhafter – mit den unterschiedlichen Instrumenten eines Orchesters. Einige der Komponenten erklingen leiser, als sie es sollten. Außerdem fügen sie sich nicht recht ein – sie scheinen verstimmt zu sein. Die falschen Töne weisen darauf hin, dass das ansonsten so erfolgreiche Standardmodell der Kosmologie in ernsthaften Schwierigkeiten ist – oder dass etwas mit den Daten selbst nicht stimmt.

Theorie mit kleinen Fehlern

Dieses Standardmodell haben Kosmologen in den letzten Jahrzehnten entwickelt. Es hat sich bewährt, weil es eine beeindruckende Anzahl von Eigenschaften des Universums begründet. Das Modell erklärt die Häufigkeiten der leichtesten Elemente (die verschiedenen Isotope von Wasserstoff sowie Helium und Lithium) und liefert mit 14 Milliarden Jahren ein Alter für den Kosmos, das mit dem geschätzten Alter der ältesten Sterne vereinbar ist. Es sagt die kosmische Hintergrundstrahlung und deren nahezu vollständige Homogenität voraus und erklärt, warum viele weitere Eigenschaften des Universums gerade so sind, wie wir sie beobachten.

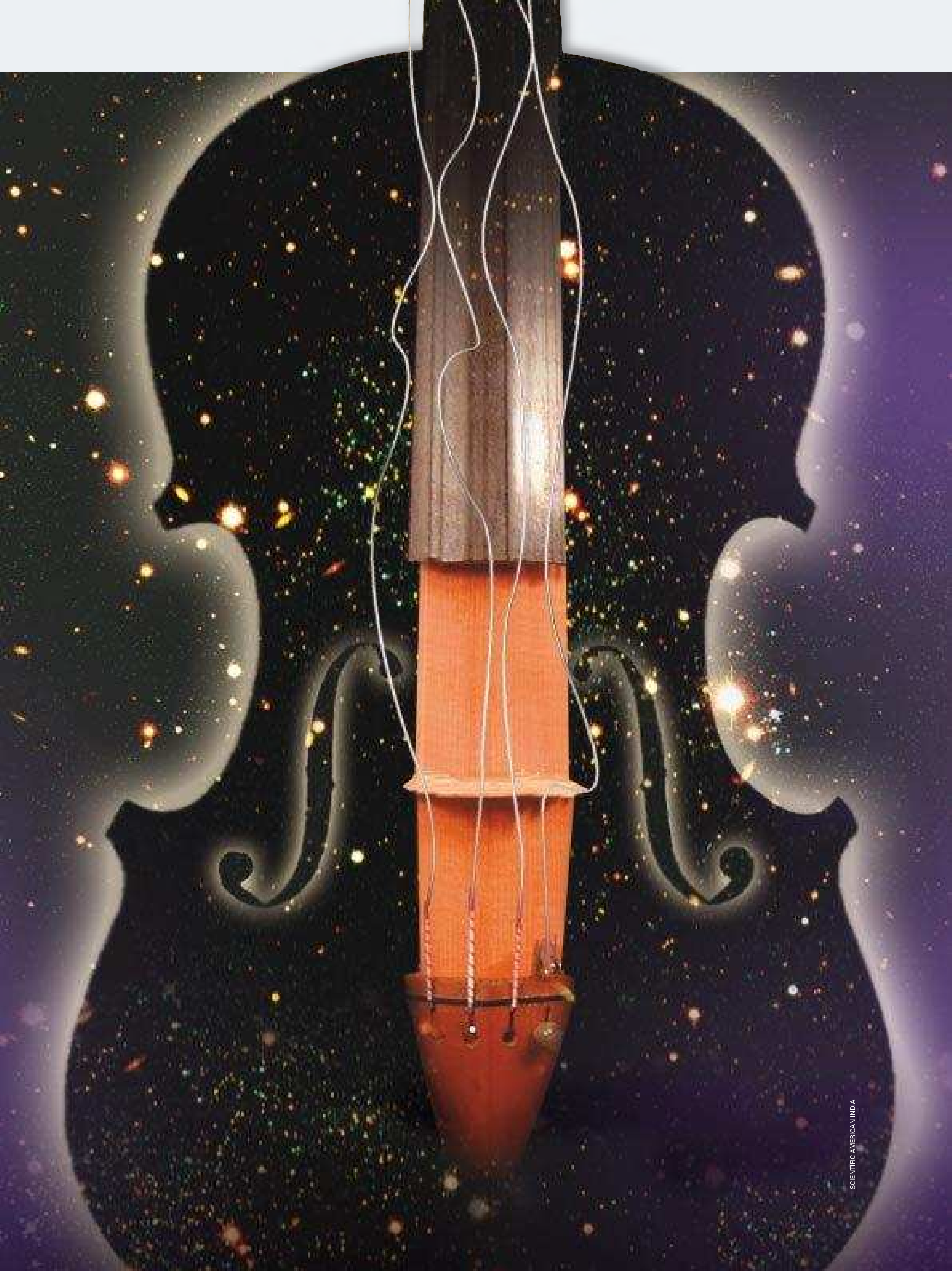
Das Standardmodell enthält drei wichtige Komponenten:

- die kosmische Inflation,
- eine Größe namens kosmologische Konstante, deren Symbol der große griechische Buchstabe Lambda (Λ) ist, sowie
- unsichtbare Teilchen, die so genannte Kalte Dunkle Materie.

Fachleute bezeichnen es deshalb etwas umständlich als »inflationäres Modell mit kosmologischer Konstante und Kalter Dunkler Materie« (englisch *inflationary lambda cold dark matter model*) oder kurz: ΛCDM-Modell.

Die Inflation, die in den ersten Sekundenbruchteilen nach dem Urknall stattfand, ist eine Phase gewaltig beschleunigter Expansion des Kosmos, die mit einem Ausbruch von Strahlung endete. Die Inflation liefert uns eine Erklärung dafür, warum das Universum so groß ist, so viel Materie enthält und so extrem homogen ist. Zugleich erklärt sie aber auch, warum das Universum nicht vollständig homogen ist: weil zufällige Quantenfluktuationen der Energiedichte bis zur Größe von Galaxienhaufen (und größer) aufgebläht wurden. ▷

Die kosmische Hintergrundstrahlung, die das Weltall erfüllt, bildet gleichsam die Sinfonie des Universums. Doch einige der mitwirkenden Instrumente sind offenbar verstimmt.



SCIENTIFIC AMERICAN INDIA

▷ Nach dem Ende der Inflation, so das Modell, zogen sich die etwas dichteren Regionen unter der Wirkung ihrer eigenen Schwerkraft zusammen und nahmen weiter an Dichte zu – sie »kollabierten«, wie Astronomen sagen. Dadurch entstanden die Masseansammlungen, aus denen sich die heute sichtbaren Galaxien und Galaxienhaufen entwickelt haben. Der Kollaps muss durch die Kalte Dunkle Materie kräftig unterstützt worden sein. Noch ist unbekannt, welche Partikel sich konkret hinter diesem Begriff verbergen; es sind aber offenbar große Wolken von Teilchen, die sich nur durch die Wirkung ihrer Schwerkraft bemerkbar machen. Die kosmologische Konstante Λ schließlich ist eine seltsame Art von Anti-Gravitation, die den Kosmos in seiner heutigen Entwicklungsphase immer schneller expandieren lässt (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/2004, S. 42, und Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2005, S. 46).

So erfolgreich das Standardmodell bei der Erklärung all dieser Eigenschaften des Universums ist – wenn Astronomen die Temperaturschwankungen der Hintergrundstrahlung genauer analysieren, tauchen Probleme auf. Die Hintergrundstrahlung ist das wichtigste Werkzeug der Forscher für die Untersuchung der großräumigen Eigenschaften des Kosmos. Es ist das älteste Licht im Universum, entstanden wenige hunderttausend Jahre nach dem Urknall. Damals wandelte sich die Materie im rasch expandierenden und abkühlenden Kosmos von einem dichten, undurchsichtigen Plasma in ein durchsichtiges Gas. Die Hintergrundstrahlung, seit 14 Milliarden Jahren unterwegs, liefert uns also ein Bild des frühen Universums. Da dieses aus großer Entfernung herrührt, bietet es uns zudem eine Momentaufnahme der großräumigen kosmischen Struktur.

Arno Penzias und Robert Wilson von den Bell-Laboratorien in Holmdel (New Jersey) entdeckten 1965 die Hintergrundstrahlung und maßen als Erste ihre Temperatur. Heute befasst sich ein Großteil der Kosmologen damit, die Temperaturunterschiede dieser Strahlung zwischen verschiedenen Himmelsregionen genau zu analysieren. Diese richtungsabhängigen Temperaturschwankungen – die Wissenschaftler sprechen von »Anisotropie« – spiegeln die Dichtefluktuationen im frühen Universum wieder. 1992 gelang mit dem Satelliten Cobe (Cosmic Background Explorer) erstmals der Nachweis dieser Schwankungen, inzwischen hat uns WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) hoch aufgelöste Karten der Fluktuationen geliefert.

Zerlegung in Harmonische entlarvt die Dissonanzen

Mit Modellen wie dem ΛCDM-Modell lässt sich nicht das genaue Muster der Fluktuationen errechnen. Sie liefern lediglich Aussagen über die statistischen Eigenschaften der Schwankungen – und damit über die mittlere Größe und die Größenverteilung, die sie umfassen. Allerdings werden manche dieser statistischen Eigenschaften nicht nur vom ΛCDM-Modell prognostiziert, sondern auch von einigen einfacheren inflationären Modellen, welche die Physiker im Lauf der Zeit als Alternativen entwickelt hatten. Die Forscher bezeichnen diese Eigenschaften deshalb als generische Vorhersagen der Inflation. Wenn es also eine inflationäre Phase gegeben hat, dann müssen diese allgemeinen Vorhersagen zutreffen, unabhängig von anderen Einzelheiten des Modells. Lässt sich hingegen eine dieser Voraussagen widerlegen, so wäre dies eine Herausforderung der Inflationstheorie, die nicht größer sein könnte. Und genau dazu könnten die ungewöhnlichen Befunde in der Hintergrundstrahlung führen.

Für die Vorhersagen zerlegen die Forscher die Temperaturschwankungen zunächst in ein Spektrum von Schwingungszuständen (Moden), die so genannten harmonischen Kugelfunktionen. Dies ähnelt der Zerlegung eines Klangs in ein Spektrum von Noten (siehe Kasten S. 34). Da die Dichtefluktuationen im frühen Universum – also lange bevor aus ihnen Galaxien entstanden sind – mit Schallwellen verglichen werden können, lässt sich wieder die Orchesteranalogie heranziehen: Die Gesamtkarte der Temperaturschwankungen am Himmel gleicht der Musik des gesamten Orchesters, jeder einzelne Mode entspricht einem bestimmten Instrument.

Die erste generische Vorhersage der Inflation ist die »statistische Isotropie« der Fluktuationen. Das bedeutet, die Schwankungen der Hintergrundstrahlung sollten keinerlei Bevorzugung einer Himmelsrichtung aufweisen.

Die Inflation sagt weiterhin voraus, dass die Amplitude der einzelnen Moden (also in unserer Analogie die Lautstärke der einzelnen Instrumente) innerhalb einer vorgegebenen Bandbreite rein zufällig ist. Genauer gesagt folgt die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten dabei einer Glockenkurve, die als Gauß-Verteilung bekannt ist. Die wahrscheinlichste Amplitude, am Maximum der Kurve gelegen, liegt zwar bei null, aber im Allgemeinen haben die Amplituden von null verschiedene Werte, wobei die Wahrscheinlichkeit mit der Größe der Amplitude abnimmt. Jeder Schwingungszustand besitzt seine eigene Gauß-Kurve und die Breite dieser Kurve bestimmt, wie stark (mit welcher Lautstärke) dieser Mode vertreten ist.

Im inflationären Modell sollten nun die Amplituden aller Moden Gauß-Kurven etwa gleicher Breite aufweisen. Das liegt daran, dass die Inflation durch ihr exponentielles Aufblähen des Universums wie ein kosmisches Bügeleisen alle Spuren früherer charakteristischer Skalen plättet. Das sich so ergebende Leistungsspektrum wird als flach bezeichnet, weil es keine herausstechenden Merkmale aufweist. Signifikante Abweichungen

IN KÜRZE

▶ **Viele Eigenschaften des Universums** lassen sich sehr gut durch ein bestimmtes kosmologisches Modell beschreiben (das ΛCDM-Modell). Doch gewisse Befunde sind damit nicht in Einklang zu bringen.

▶ **Diese rätselhaften Daten** stammen aus Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung. Fluktuationen in diesem Mikrowellenhintergrund teilen die Astronomen zur genaueren Analyse in einzelne Schwingungszustände oder Moden auf – ähnlich wie sich eine Komposition in die Stimmen der einzelnen Instrumente zerlegen lässt. In dieser Analogie spielen der Bass und die Tuba falsch: Sie sind zu leise und folgen der falschen Melodie.

▶ **Zwar ließen sich diese Abweichungen** durch noch unbekannte Strahlungsquellen im Sonnensystem erklären – doch es sieht eher so aus, als sei die ansonsten sehr erfolgreiche Theorie der Inflation in ernsten Schwierigkeiten.

Der Satellit WMAP misst die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung im K-Band (23 Gigahertz, oben), im W-Band (94 Gigahertz, unten) und in drei weiteren Bändern (nicht abgebildet). Die ovalen Karten zeigen – analog zu einer Projektion der gesamten Erdoberfläche – den kompletten Himmel. Der horizontal verlaufende rote Streifen repräsentiert die Strahlung aus dem Band der Milchstraße. Solche Vordergrundstrahlung ist wellenlängenabhängig. Dadurch lässt sie sich identifizieren und aus den Daten der Hintergrundstrahlung eliminieren.

–200 +200
Temperatur in Mikrokelvin

NASA / WMAP SCIENCE TEAM

können nur in solchen Moden auftauchen, die am Anfang oder am Ende der Inflation entstehen.

Die harmonischen Kugelfunktionen repräsentieren die unterschiedlich komplizierten Arten, auf die eine Kugel schwingen kann. Wenn wir uns diese Funktionen ein wenig genauer anschauen, können wir erkennen, wo die Beobachtungen in beunruhigenden Konflikt mit dem Modell geraten. Die Benutzung dieser Moden ist zweckmäßig, weil all unsere Informationen über das ferne Universum auf eine einzige Kugelfläche – die Himmelskugel – projiziert vorliegen. Der niedrigste Ton (mit $l=0$ bezeichnet) ist der Monopol: Die Kugel pulsiert als Ganzes. Der Monopol der Hintergrundstrahlung ist seine mittlere Temperatur, die bei 2,725 Kelvin liegt (siehe Kasten S. 34).

Der zweitniedrigste Ton ist der Dipol ($l=1$), bei dem die Temperatur auf der einen Hemisphäre höher und auf der anderen entsprechend niedriger ist. Der Dipol wird durch die Dopplerverschiebung dominiert, die von der Bewegung des Sonnensystems relativ zur Hintergrundstrahlung herrührt: Der Himmel erscheint in der Richtung, in die sich unsere Sonne bewegt, geringfügig wärmer.

Ganz allgemein bezeichnen wir den Schwingungszustand für jeden Wert von l (0, 1, 2, ...) als Multipol. Jede auf eine Kugeloberfläche gezeichnete Karte, sei es die Temperatur der Hintergrundstrahlung oder die Topografie der Erde, lässt sich in solche Multipole zerlegen. Die niedrigsten Multipole auf unserer Temperaturkarte entsprechen dabei den größten Schwankungen von Kontinent- oder Ozeangröße. Höhere Multipole entsprechen immer kleineren Strukturen wie Ebenen, Bergen und Hügeln (und Tälern und Gräben), die geordnete Muster auf den größeren Strukturen bilden. Die gesamte komplexe Topografie ergibt sich dann als Summe aller einzelnen Multipole.

Im Fall der Hintergrundstrahlung lässt sich jedem Multipol l eine Gesamtintensität C_l zuweisen, die vereinfacht gesagt die mittlere Höhe der Berge und mittlere Tiefe der Täler angibt, die zu diesem Multipol gehören. In unserem Orchesterbild entspricht die Gesamtintensität der mittleren Lautstärke des jeweiligen Instruments. Die Menge aller Intensitäten für alle Werte von l bezeichnen die Kosmologen als winkelabhängiges Leistungsspektrum (englisch *angular power spectrum*); es wird meist in Form eines Diagramms dargestellt.

Die Kurve im Diagramm beginnt bei C_2, weil es erst ab $l=2$ echte Informationen über kosmische Fluktuationen gibt. Der Kasten auf S. 36 zeigt sowohl das von WMAP gemessene winkelabhängige Leistungsspektrum als auch die Vorhersage des ΛCDM-Modells, das die Messungen am besten wiedergibt. Die gemessenen Intensitäten der beiden niedrigsten Multipole C_2 und C_3, also des Quadrupols und des Oktupols, sind deutlich niedriger als die Vorhersagen. Schon dem Cobe-Team fiel dieses Problem bei niedrigen l-Werten auf; WMAP hat diesen Befund unlängst bestätigt. Topografisch ausgedrückt sind die größten Kontinente und Ozeanbecken auf unserer Karte seltsam flach. Und in unserem Orchesterbild fehlen der Kontrabass und die Tuba.

Die tiefen Töne fehlen

Der Effekt ist noch dramatischer, wenn wir uns nicht die Gesamtintensitäten, sondern die so genannte Winkelkorrelationsfunktion $C(\Theta)$ anschauen. Stellen wir uns vor, wir betrachten zwei Punkte am Himmel, die um einen Winkel Θ auseinander liegen, und untersuchen, ob beide wärmer, beide kälter oder einer wärmer und einer kälter als der Durchschnitt sind. Dann beschreibt die Winkelkorrelationsfunktion $C(\Theta)$, wie stark die Temperaturschwankungen zweier solcher Punkte miteinander korrelieren, gemittelt über alle Punkte am Himmel. Messungen zeigen, dass $C(\Theta)$ in unserem Universum für Winkel größer als etwa 60 Grad fast null ist. Das bedeutet: Fluktuationen in zwei um mehr als 60 Grad getrennte Richtungen sind völlig unkorreliert. Auch das ist ein Zeichen dafür, dass die von der Inflation vorhergesagten tiefen Töne fehlen.

Das Fehlen einer Korrelation für große Winkelabstände hatte sich zuerst in den Cobe-Daten gezeigt und konnte nun von WMAP bestätigt werden. Die Kleinheit von $C(\Theta)$ bei großen Winkeln bedeutet nicht nur, dass C_2 und C_3 klein sind, sondern auch, dass das Verhältnis der ersten paar Gesamtintensitäten – bis zu C_4 – ebenfalls ungewöhnlich ist. Dieser Befund für große Winkel steht in Widerspruch zu allen generischen inflationären Modellen.

Für dieses Rätsel gibt es drei mögliche Lösungen. Erstens: Das ungewöhnliche Ergebnis ist nichts weiter als ein statistischer Ausreißer. Insbesondere könnten die Unsicherheiten in den Daten größer sein als angenommen. Zweitens: Die Korrelationen sind ein Artefakt der Beobachtungen – ein unerwarteter physikalischer Effekt, den die Forscher bei der Analyse der WMAP-Daten nicht berücksichtigt haben. Und schließlich drittens: Es gibt tatsächlich ein ernstes Problem mit der Theorie.

Eine Reihe von Forschern hat die erste Lösung vertreten. George Efstathiou von der Universität Cambridge (England) war der Erste, der 2003 die statistische Methode zur Bestimmung des Quadrupols und ihre Unsicherheiten in Frage stellte. Er meinte, aus den Daten würden ▷

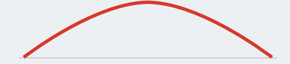
Sphärenklänge

Wenn Wissenschaftler davon sprechen, dass gewisse Instrumente in der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung zu leise und schräg spielen, was meinen sie dann damit – und woher wissen sie es überhaupt?

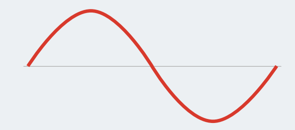
Mit ausgefeilten Sensoren messen die Kosmologen die Intensitätsverteilung der Mikrowellenstrahlung am gesamten Himmel. Diese Strahlung ähnelt derjenigen, die ein idealer Strahler – ein so genannter Schwarzer Körper – mit einer Temperatur von 2,725 Kelvin aussenden würde. Aus geringfügigen Anisotropien ergeben sich winzige Temperaturschwankungen der Strahlung. Diese Fluktuationen untersuchen die Wissenschaftler mit Hilfe spezieller mathematischer Funktionen, den Kugelfunktionen.

Das Prinzip des Analyseverfahrens lässt sich verstehen, indem man zunächst die Schwingungen einer Violinsaite betrachtet. Jede Saite kann eine unendliche Anzahl möglicher Töne erzeugen, sogar ohne dass wir den Finger auf das Griffbrett setzen, um die Saite zu verkürzen. Wir können jedem dieser Töne eine Zahl *n* zuordnen, die angibt, an wie vielen Punkten (abgesehen von den beiden Enden) sich die Saite nicht bewegt, wenn dieser Ton erklingt. Solche Punkte auf der Saite heißen »Knoten«.

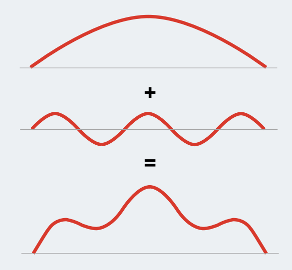
Der niedrigste Ton, der keinen Knoten aufweist ($n=0$), ist der Grundton (erste Harmonische). Wenn er erklingt, schwingt – abgesehen von den Enden – die Saite auf ihrer gesamten Länge hin und her.



Der Ton mit einem einzigen, genau in der Mitte gelegenen Knoten ($n=1$) ist die zweite harmonische Schwingung. Dabei schwingt die eine Hälfte der Saite in die eine und die andere Hälfte in die andere Richtung. Wenn wir *do-re-mi-fa-so-la-ti-do* singen, ist das letzte *do* gerade die zweite Harmonische des ersten *do*. Ein Ton mit zwei Knoten ist die dritte Harmonische und so weiter, wobei die Knoten eines Tons jeweils gleichmäßig über die Saite verteilt sind.

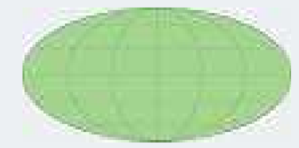


Jede beliebige Schwingung einer Saite – egal wie kompliziert – lässt sich in solche harmonischen Schwingungen zerlegen. So können wir die nachfolgend gezeigte Schwingung als Summe des Grundtons ($n=0$) und der fünften Harmonischen ($n=4$) darstellen, wobei die fünfte Harmonische eine kleinere Amplitude aufweist als der Grundton. In unserer Orchesteranalogie bedeutet dies, dass das Instrument Nummer vier leiser spielt als Instrument Nummer null. Allgemein gilt: Je komplizierter die Schwingung, desto mehr Harmonische brauchen wir für ihre Beschreibung.

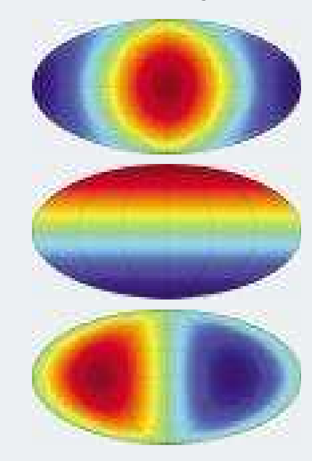


Die harmonischen Kugelfunktionen (mit Y_{lm} bezeichnet) können wir uns als Schwingungszustände (Moden) eines kugelförmigen Trommelfells vorstellen. Da die Kugeloberfläche zweidimensional ist, benötigen wir zwei Zahlen *l* und *m*, um die Moden zu beschreiben. Für jeden Wert von *l* (0, 1, 2, ...) ist *m* eine ganze Zahl zwischen *l* und $-l$. Die Kombination aller Schwingungen mit unterschiedlichen Werten von *m*, aber dem gleichen Wert von *l*, nennen wir einen Multipol.

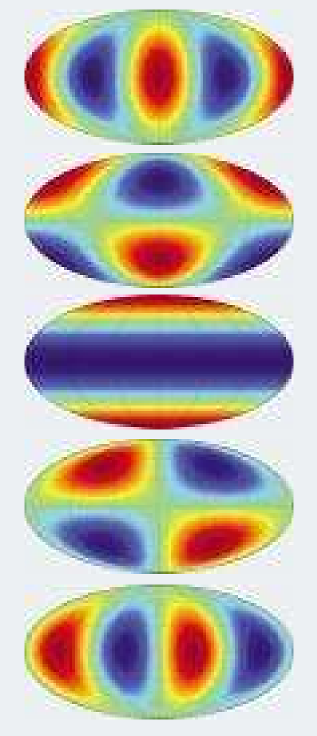
Die harmonischen Kugelfunktionen lassen sich mit einer Karte darstellen, auf die – ähnlich wie bei einer Weltkarte – die gesamte Kugeloberfläche projiziert ist. Dabei geben die Farben auf der Karte an, ob eine Region eine höhere oder eine niedrigere Temperatur als der Durchschnitt (grün) aufweist. Beim Monopol ($l=0$) schwingt die Kugeloberfläche als Ganzes; die gesamte Karte ist grün.



Beim Dipol ($l=1$) schwingt die halbe Kugeloberfläche nach außen (rot), die andere nach innen (blau). Es gibt drei Dipol-Moden ($m=-1, 0, 1$), die Schwingungen in den drei Raumrichtungen entsprechen. Die grün dargestellten Bereiche mit Durchschnittstemperatur heißen analog zu den Knoten auf der Violinsaite »Knotenlinien«. Je größer *l*, desto mehr Knotenlinien gibt es.



Der Quadrupol ($l=2$) hat fünf Moden, der Oktupol ($l=3$) sieben und so weiter. Dabei entstehen immer kompliziertere Muster der Temperaturschwankungen beziehungsweise der Schwingungen der Kugeloberfläche.



Jedes beliebige Muster von Temperaturschwankungen kann man nun als Überlagerung dieser Kugelfunktionen darstellen, so wie sich jede beliebige Schwingung der Violinsaite aus den Harmonischen aufbauen lässt. Dabei hat jede Kugelfunktion ihre eigene Amplitude, die angibt, wie stark die entsprechende Schwingung vertreten ist beziehungsweise wie laut dieses Instrument im kosmischen Orchester spielt.

HARMONISCHE SCHWINGUNGEN: ALISON KENDALL; KUGELFUNKTIONEN: CRAIG COPI, CASE WESTERN RESERVE UNIVERSITY

sich erheblich größere Unsicherheiten ergeben. Seitdem haben sich auch viele andere Forscher die Methode, mit der das WMAP-Team die C_l-Werte für niedrige l ermittelt, genau angesehen. Sie kamen zu dem Schluss, dass die durch die Emissionen unseres eigenen Milchstraßensystems verursachten Unsicherheiten tatsächlich größer sind als vom WMAP-Team ursprünglich angenommen.

Um die Zweifel an der Signifikanz der Abweichungen zwischen Theorie und Beobachtung besser bewerten zu können, haben sich mehrere Forschungsgruppen nicht nur die Gesamtintensitäten der Moden angeschaut. Zusätzlich zu C_l enthält nämlich jeder Multipol noch Richtungsinformationen. Der Dipol zum Beispiel verweist auf eine Richtung, in der die wärmere Hälfte der Himmelssphäre liegt. Je höher ein Multipol, desto mehr solcher Richtungsinformationen enthält er. Wäre die Abweichung bei den Intensitäten tatsächlich nicht mehr als ein statistischer Ausreißer, dann sollte die Richtungsinformation, die man aus denselben Daten ableitet, das korrekte generische Verhalten zeigen. Doch das ist nicht der Fall.

Das zeigte sich erstmals im Jahr 2003: Angelica de Oliveira-Costa und Max Tegmark von der Universität von Pennsylvania in Philadelphia sowie Matias Zaldarriaga von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) und in den sich gegenüberliegenden Himmelshälften. Was sie fand, widerspricht dem inflationären Standardmodell der Kosmologie: Die beiden Hemisphären wiesen häufig eine erheblich unterschiedliche Leistung auf. Noch überraschender war allerdings, dass das Paar mit der größten Differenz gerade jenes war, bei denen die Hemisphären durch die Ekliptik getrennt sind, also durch die Ebene, in der unsere Erde die Sonne umrundet. Dies war das erste Anzeichen dafür, dass die Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung, von denen man bislang dachte, sie seien – abgesehen von geringfügigen Beiträgen durch Emissionen innerhalb der Galaxis – kosmologischen Ursprungs, ein Störsignal enthalten, das mit dem Sonnensystem zusammenhängt.

Ausgezeichnete Richtungen in der Hintergrundstrahlung

Parallel zu diesen Arbeiten entwickelte einer von uns (Starkman) zusammen mit Craig Copi und Dragan Huterer von der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) eine neue Methode, mit der sich die Fluktuationen der Hintergrundstrahlung als Vektoren – also als gerichtete Größen – darstellen lassen. Damit konnten wir überprüfen, ob die Schwankungen der Hintergrundstrahlung eine besondere Richtung auszeichnen oder nicht. Es gelang uns nicht nur,

Die Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung enthalten ein Störsignal, das mit dem Sonnensystem zusammenhängt

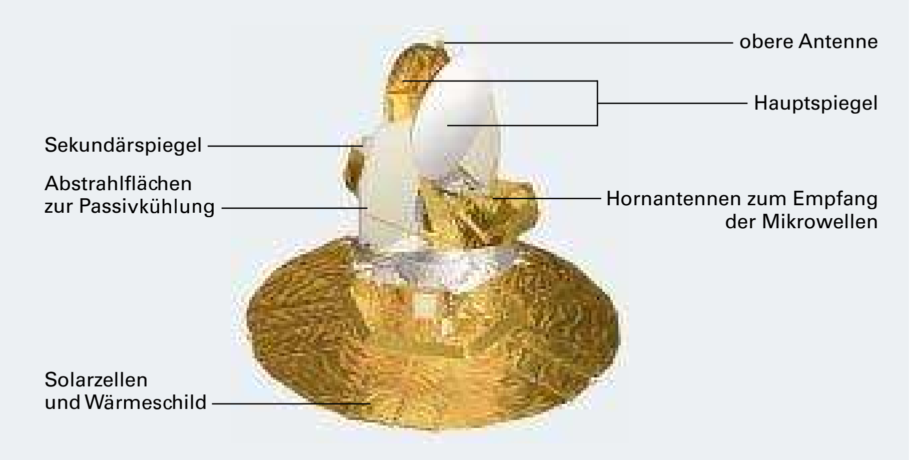
Andrew Hamilton von der Universität von Colorado in Boulder stellten fest, dass die Vorzugsachsen des Quadrupols und des Oktupols bemerkenswert gut übereinstimmen. Dies sind dieselben Moden, bei denen zu wenig Leistung beobachtet wird. Dem generischen inflationären Modell zufolge sollten diese beiden Moden völlig unabhängig voneinander sein – man würde also keinerlei gemeinsame Ausrichtung erwarten.

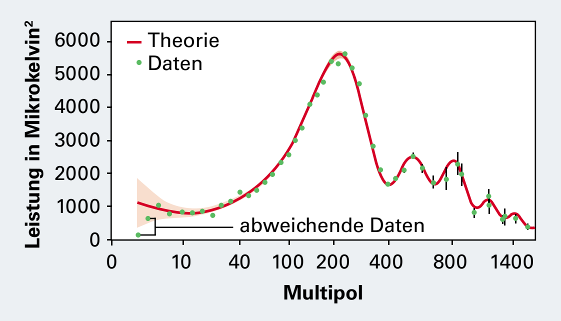
Ein Team um Hans Kristian Eriksen von der Universität Oslo präsentierte im gleichen Jahr weitere Ergebnisse, die auf eine gemeinsame Ausrichtung hindeuten. Die Gruppe teilte den Himmel in alle möglichen Kombinationen von jeweils zwei Hemisphären und bestimmte die relative Intensität der Fluktuationen die Ergebnisse von Oliveira-Costa und ihrem Team zu bestätigen, wir stießen 2004 auch auf weitere unerwartete Korrelationen. Viele der Vektoren befinden sich fast genau auf der Ekliptik. Innerhalb dieser Ebene wiederum drängen sie sich auffallend in der Nähe der so genannten Äquinoktialpunkte – das sind die beiden Punkte am Himmel, in denen die Ekliptik den Himmelsäquator schneidet. Zudem sind diese Vektoren ähnlich orientiert wie die Bewegungsrichtung der Sonne. Ein anderer Vektor liegt in unmittelbarer Nähe zu der durch den lokalen galaktischen Superhaufen definierten »supergalaktischen Ebene«.

Für jede dieser Korrelationen ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie rein zufällig auftritt, kleiner als 1 : 300, selbst un- ▷

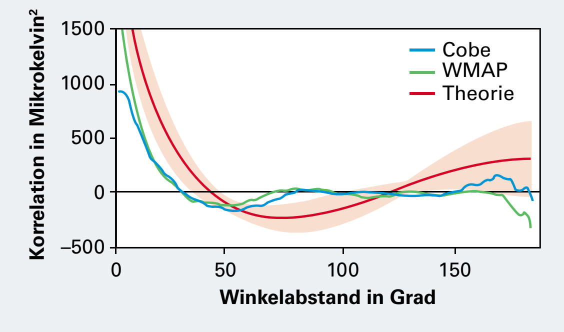
Rätselhafte WMAP-Daten

Die WMAP-Raumsonde liefert Daten, die in dreifacher Hinsicht Rätsel aufgeben.



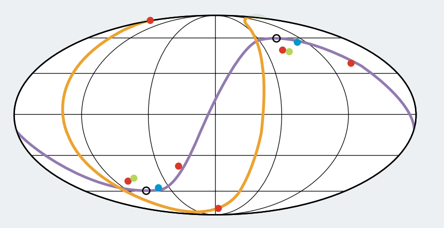


1 Winkelabhängiges Leistungsspektrum
Die meisten der WMAP-Messungen sind, wie auch frühere Messungen, in exzellenter Übereinstimmung mit den Vorhersagen des ΛCDM-Modells. Nur die beiden ersten Datenpunkte – der Quadrupol und der Oktupol – weisen zu wenig Leistung auf.



2 Winkelkorrelationsfunktion
Diese Funktion verknüpft Punkte am Himmel, die einen bestimmten Winkel auseinander liegen. Die aus den Daten von WMAP und Cobe bestimmten Funktionen sollten der theoretischen Kurve (rot) folgen, sind jedoch oberhalb eines Winkels von 60 Grad fast null.

3 Gemeinsame Ausrichtung der ersten beiden Multipole
Der Quadrupol (blaue Punkte) und der Oktupol (rote Punkte) sollten unabhängig voneinander orientiert sein. Stattdessen weisen sie beide etwa auf die Äquinoktialpunkte der Erdbahn (offene Kreise) und in die Richtung der Eigenbewegung des Sonnensystems (Dipol, grüne Punkte). Zudem liegen sie nahezu in der Ebene der Ekliptik (violette Linie). Zwei liegen in der supergalaktischen Ebene, die das Milchstraßensystem, die lokale Galaxiengruppe und die nächsten Galaxienhaufen enthält (orange Linie). Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Übereinstimmungen rein zufälliger Natur sind, ist kleiner als 1 : 10 000.



SATELLIT: NASA / WMAP SCIENCE TEAM; GRAFIKEN: ALISON KENDALL

▷ ter sehr konservativen statistischen Annahmen. Die Korrelationen sind zwar nicht völlig unabhängig voneinander, aber die Wahrscheinlichkeit, dass sie in ihrer Gesamtheit gerade in dieser Kombination auftreten, ist sicherlich geringer als 1 : 10 000 – und das berücksichtigt noch nicht einmal alle seltsamen Eigenschaften der niedrigen Multipole.

Einige Wissenschaftler haben Bedenken geäußert, weil all diese Ergebnisse aus einer Karte der Hintergrundstrahlung für den gesamten Himmel abgeleitet wurden. Eine solche Gesamtkarte mag zunächst wie ein Vorteil aussehen, doch innerhalb eines Himmelsbands um die galaktische Ebene herum könnten die gemessenen Temperaturen fehlerbehaftet sein. Denn um die Hintergrundstrahlung in diesem Streifen zu bestimmen, müssen die Forscher zunächst die Beiträge unserer Milchstraße abziehen. Sind die dazu vom WMAP-Team und anderen Gruppen verwendeten Methoden womöglich nicht zuverlässig genug?

Unbekannte Quelle im Sonnensystem?

Tatsächlich warnt das WMAP-Team andere Forscher sogar davor, unkritisch die Hintergrundstrahlungskarte des gesamten Himmels zu benutzen. Für seine eigenen Analysen nutzt es nur die Himmelsbereiche außerhalb des Milchstraßenbands. Uros Seljak von der Universität Princeton (New Jersey) und Anze Slosar von der Universität Ljubljana (Slowenien) haben gezeigt, dass die statistische Signifikanz mancher Korrelationen bei einigen Wellenlängen tatsächlich abnimmt, wenn man das galaktische Band außer Acht lässt. Allerdings fanden die beiden Wissenschaftler, dass die Korrelationen dafür bei anderen Wellenlängen stärker werden. Auch unsere eigene Arbeit deutet darauf hin, dass der Einfluss der Galaxis die beobachteten Korrelationen nicht erklären kann. Es wäre ohnehin überraschend, wenn ein Fehler bei der Berücksichtigung der Milchstraße zu einer Ausrichtung der Hintergrundstrahlung in der Ebene unseres Sonnensystems führen würde.

Eine genauere Betrachtung des winkelabhängigen Leistungsspektrums liefert uns ein weiteres Argument für einen Zusammenhang der Hintergrundstrahlung mit unserem Sonnensystem. Neben der reduzierten Leistung bei kleinen l-Werten gibt es drei weitere Punkte – $l = 22$, $l = 40$ und $l = 210$ –, bei denen das beobachtete Leistungsspektrum signifikant von den

Vorhersagen des ansonsten am besten zu den Daten passenden ΛCDM-Modells abweicht. Obwohl viele Kosmologen diese Abweichungen bemerkt haben, ist den meisten bislang entgangen, dass auch diese drei Abweichungen mit der Ekliptik zu tun haben.

Zwei mögliche Erklärungen für die Korrelation zwischen den niedrigen Multipolen der Hintergrundstrahlung und dem Sonnensystem bieten sich an. Die erste sieht systematische Fehler am Werk: Fehler in der Konstruktion oder in unserem Verständnis der WMAP-Instrumente oder Fehler in der Analyse der von ihnen gelieferten Daten. Allerdings ist das WMAP-Team äußerst umsichtig vorgegangen und hat sowohl die Instrumente als auch die Auswertungsmethoden mehrfach überprüft. Es ist nur schwer vorstellbar, dass sich trotzdem unechte Korrelationen eingeschlichen haben sollten. Außerdem haben wir ähnliche Korrelationen auch in den Daten des Cobe-Satelliten gefunden, bei dem andere Instrumente und andere Auswerteverfahren benutzt wurden – somit sollten auch etwaige systematische Fehler von beiden Satelliten unterschiedlich sein.

Die zweite, wahrscheinlichere Erklärung ist deshalb, dass eine bislang unbekannte Quelle die Daten kontaminiert oder irgendetwas die Photonen im Mikrowellenbereich absorbiert. Diese Quelle müsste natürlich mit dem Sonnensystem assoziiert sein – möglicherweise eine Wolke aus Staub in seinen fernen Außenbezirken. Aber auch diese Erklärung ist nicht ohne Probleme: Wie kann eine Quelle im Sonnensystem so hell im Mikrowellenbereich strahlen, dass sie von den Cobe- und WMAP-Instrumenten gesehen wird, beziehungsweise bei solchen Wellenlängen absorbieren – und zugleich bei allen anderen Wellenlängen derart unauffällig sein, dass man sie bisher noch nicht entdeckt hat?

Die Theorie der Inflation ist offenbar in großer Bedrängnis

Natürlich hoffen wir, dass wir eine solche Vordergrundquelle irgendwann studieren können, um die Messungen der Hintergrundstrahlung von ihrem Einfluss zu bereinigen. Auf den ersten Blick scheint es so, als könnte die Entdeckung einer solchen Quelle im Sonnensystem all die Rätsel der Fluktuationen der Hintergrundstrahlung lösen. In Wahrheit würde sie das Problem verschlimmern. Wenn wir nämlich den Anteil des hypothetischen Vordergrunds abziehen, wäre der zurückbleibende kosmologische Anteil noch kleiner als bisher vermutet. (Jede alternative Schlussfolgerung würde erfordern, dass sich der kosmologische Anteil und der Anteil der Vordergrundquelle zufällig aufheben.) Es wäre also noch unwahrscheinlicher, dass die geringe Stärke der niedrigen Multipole nur ein statistischer Ausreißer ist. Wie es scheint, kommt die Idee der Inflation schwer in Bedrängnis.

Falls das Universum einer Brezel oder einem Donut gleicht, wären wir in der Lage, seine Form zu »hören«

Ließe sich statistisch robust bestätigen, dass es auf großen Winkelskalen weniger Leistung im Fluktuationsspektrum der Hintergrundstrahlung gibt, so müssten wir bezüglich unserer Modelle für das frühe Universum gewissermaßen zurück ans Zeichenbrett. Die gegenwärtigen Alternativen zur generischen Inflation sind allerdings nicht gerade attraktiv. Zwar könnte ein sorgfältig abgestimmtes inflationäres Modell uns genau das Leistungsspektrum liefern, das wir beobachten. Doch eine solche »Designer-Inflation« würde nicht länger dem entsprechen, was wir eine überzeugende wissenschaftliche Theorie nennen – sie würde auf einer Stufe stehen mit den Epizykeln, die Ptolemäus einst für die Planetenbahnen einführte, um das geozentrische Weltbild zu retten.

Eine alternative Erklärungsmöglichkeit wäre, dass das Universum eine unerwartet komplexe Topologie aufweist (vergleiche »Ist der Raum endlich?«, Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 50). Wenn das Weltall endlich und auf interessante Weise mit sich selbst verbunden ist – vielleicht wie ein Donut oder wie eine Brezel –, dann würden sich die erlaubten Schwingungsmoden in auffälliger Weise ändern. Wir wären also in der Lage, die Form des Universums zu »hören« – so, wie wir den Unterschied zwischen Kirchenglocken und einem Windglockenspiel hören können. Dabei würden die niedrigsten Töne – also die Fluktuationen auf den größten Skalen – am deutlichsten die Form (und die Größe) des Kosmos widerspiegeln. Das Universum könnte durchaus eine solche interessante Topologie aufweisen, aber durch die Inflation so weit aufgebläht worden sein, dass sich diese Topologie für uns über den Horizont geschoben hat. Deshalb würden wir diese Topologie nicht nur nicht direkt sehen können, sondern es wäre für uns auch schwer, sie überhaupt nachzuweisen.

Gibt es also überhaupt Hoffnung, dass sich diese Fragen einmal lösen lassen? Ja, denn wir erwarten weitere Daten von WMAP, nicht nur über die Temperatur, sondern auch über die Polarisation der Hintergrundstrahlung. Das könnte helfen, etwaige Vordergrundquellen zu enthüllen. Zudem plant die Europäische Raumfahrtbehörde Esa für 2007 den Start des Planck-Satelliten, der die Hintergrundstrahlung in weiteren Frequenzbändern und mit einer noch höheren Winkelauflösung als WMAP vermessen soll. Zwar kann die höhere Auflösung uns vermutlich nicht dabei helfen, das Rätsel der niedrigen Multipole zu lösen. Aber indem wir in weiteren Frequenzbändern beobachten, können wir systematische Effekte und Vordergrundquellen eher eingrenzen. Die kosmologische Forschung ist weiter für Überraschungen gut – bleiben Sie auf Empfang! ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



Glenn D. Starkman ist Armington-Professor am Center for Education and Research in Cosmology and Astrophysics an der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio).



Dominik J. Schwarz hat seit seiner Promotion 1995 an der Technischen Universität Wien an mehreren Institutionen über kosmologische Fragestellungen geforscht. Seit 2004 ist er Professor für Theoretische Physik an der Universität Bielefeld. Beide arbeiten seit 2003 zusammen, als sie sich während eines Forschungsaufenthalts am europäischen Laboratorium für Teilchenphysik Cern bei Genf kennen lernten.

Die Symphonie der Schöpfung. Von Wayne Hu und Martin White in: Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 48

First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: preliminary maps and basic results. Von C. L. Bennett et al. in: Astrophysical Journal Supplemental, Bd. 148, S.1, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Frühe Spuren des menschlichen Geistes

Unser überragender Verstand und damit auch unsere Kreativität könnten viel älter sein als bisher gedacht. In Afrika benutzten Menschen wohl schon vor über 70 000 Jahren Symbole.

Von Kate Wong

Die Schneckenhäuser sind nicht größer als Maiskörner. Vorsichtig nimmt Christopher Henshilwood das kleine Stück verblichenen blauen Kartons aus der Plastiktüte und reicht es mir. In drei Reihen sind darauf 19 Gehäuse befestigt. Besonders hübsch sehen sie auf den ersten Blick nicht aus, grau und stumpf vor Alter, wie sie sind – und noch dazu nicht einmal heil.

Wir sitzen in Henshilwoods Büro in Kapstadt. Der südafrikanische Archäologe, der eine Professur an der Universität Bergen in Norwegen hat, entdeckte diese Schnecken mit seinem Team in einer Höhle an der afrikanischen Südküste rund 300 Kilometer östlich von Kapstadt. Dort, in der Blombos-Höhle, gräbt er seit Anfang der 1990er Jahre nach frühen menschlichen Zeugnissen.

Der Forscher hält die Schneckengehäuse für Überreste von fast 75 000 Jahre altem Schmuck. Alle sind sie nahezu gleich groß und tragen an der gleichen Stelle ein rundes Loch: am Rand der Öffnung, wo die Schale besonders dünn ist. Henshilwood glaubt, dass einst Menschen diese Gehäuse sammelten, durchbohrten und zu einer Kette auffädelten. Wenn das stimmt, dann sind diese schlichten kleinen Schneckenhäuser die Kronjuwelen der Menschheit. Sie wären der bislang älteste eindeutige Nachweis dafür, dass sich Menschen viel früher als bislang angenommen bewusst schmückten – was bedeutet, dass sie bereits wie wir denken konnten.

Den afrikanischen Ursprung des anatomisch modernen Menschen, wie Paläanthropologen sagen, zweifeln die meisten Experten heute nicht mehr an (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2003, S. 38). Der moderne Homo sapiens erschien in Afrika vor weit über 100 000 Jahren. Das belegen auch die 160 000 Jahre alten, modern anmutenden menschlichen Fossilien, die im Jahr 2003 bei Herto in Äthiopien entdeckt wurden. Nach einer kürzlichen Neudatierung von Fossilien des modernen Menschen aus Omo Kibish in Äthiopien könnte der Ursprung unseres Erscheinungsbilds sogar 195 000 Jahre zurückliegen (siehe Karte S. 43).

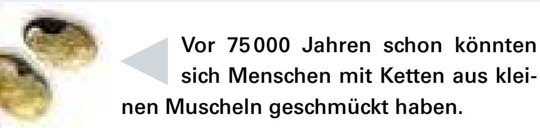
Wann aber kam der menschliche Geist auf? Wann begannen Menschen in unserer Weise zu denken und zu handeln? Vor zwanzig Jahren hätten Wissenschaftler meist geantwortet, dass vor ungefähr 40 000 Jahren eine geistig-kulturelle Revolution erfolgt sein müsse. Diese Ansicht stützte sich hauptsächlich auf die recht zahlreichen, vergleichsweise gut untersuchten kulturellen Hinterlassenschaften der eiszeitlichen Bewohner Europas aus der Zeit davor und danach. Der Schnitt zwischen den für die Region definierten Phasen Mittel- und Jungpaläolithikum (Mittlere und Obere Altsteinzeit) könnte krasser kaum sein.

Bis dahin erzeugte der Mensch, wie es lange schien, weit gehend die immer gleichen eher einfachen Steinwerkzeuge wie schon seit Zehntausenden von Jahren – dann plötzlich tauchten Schlag auf Schlag neue Ideen auf. Ganz schnell, so hat man den Eindruck, erfanden offenbar Menschen vom Rhonetal bis in die weite Ebene des heutigen Russlands ausgefeiltere Waffen, schufen weiträumige Handelsverbindungen, entdeckten bildnerische Kunst und Musik und manches

IN KÜRZE

- Nach herkömmlicher Auffassung bildeten sich die **geistigen Fähigkeiten des Menschen** recht plötzlich vor nicht einmal 50 000 Jahren heraus – recht spät angesichts dessen, dass **der anatomisch moderne Homo sapiens** damals schon seit weit über 100 000 Jahren existierte.
- **Archäologische Funde in Afrika** könnten besagen, dass viele Aspekte des modernen Denkens wesentlich früher auftraten als bisher angenommen. Vielleicht verfügte der anatomisch moderne Mensch sogar von Anfang an über einen **kreativen Verstand**.
- Auch scheint der moderne Homo sapiens nicht die einzige Menschenart mit fortgeschrittenen geistigen Fähigkeiten gewesen zu sein. Zumindest unter den **Neandertalern** gab es offenbar gleichfalls Künstler und schöpferische Talente.

OBEN: MIT FRDL. GEN. VON CHRISTOPHER HENSHILWOOD, AFRICAN HERITAGE RESEARCH INSTITUTE, CAPETOWN, SÜDAFRIKA UND UNIVERSITÄT BERGEN, NORWEGEN



Vor 75 000 Jahren schon könnten sich Menschen mit Ketten aus kleinen Muscheln geschmückt haben.

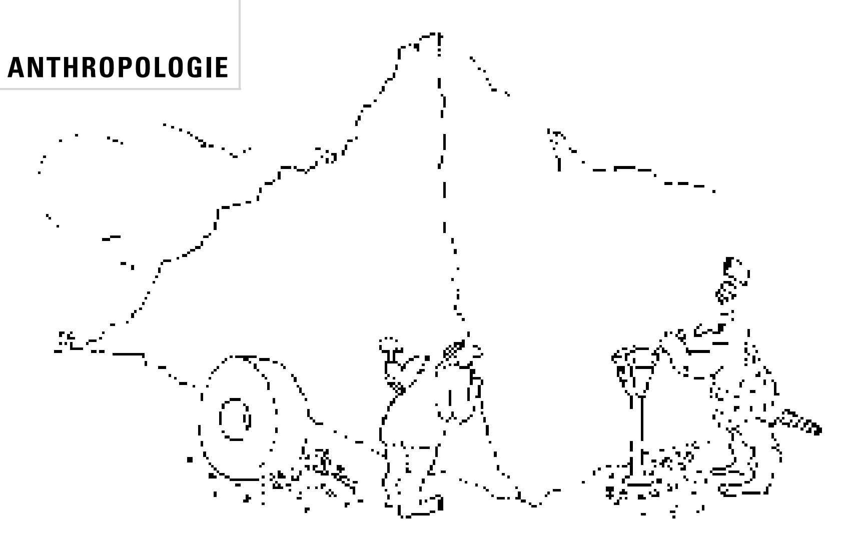
mehr, was Archäologen als modern bewerten. Wie es aussah, war unseren Vorfahren nun nach geologischem Maßstab binnen kürzester Zeit der Sprung in die Modernität gelungen.

Man könnte meinen, es sei kein Zufall gewesen, dass die Umwälzung ausgerechnet zu der Zeit stattfand, als die ersten modernen Menschen nach Europa kamen. Vor der großen Kulturwende gehörte Europa allein den Neandertalern. Obwohl für die ältesten Artefakte aus dem Jungpaläolithikum Fossilbeweise zur Urheberschaft fehlen, pflegten die Forscher diese Objekte den Neuankömmlingen zuzuschreiben. Es gibt Überlegungen, dass die in den modernen Menschen schlummernde schöpferische Begabung erst durch das Zusammentreffen mit einem anderen Menschenschlag – den Neandertalern – geweckt wurde.

Andere Forscher vermuten, die Einwanderer hätten das neue Verhalten ansatzweise schon mitgebracht. Die Basis dafür sei irgendeine Neuerung gewesen, die nicht allzu lange vorher – aber noch in Afrika – hinzugekommen sei. Zum Beispiel argumentiert Richard G. Klein von der Stanford-Universität (Kalifornien), dem Umschwung in Europa vor 40 000 Jahren entspreche durchaus der Übergang vom so genannten Mittleren ins Späte Steinzeitalter Afrikas. Jedoch lag diese Entwicklung in Afrika 5000 bis 10 000 Jahre früher. Nach Kleins Modell kann dort allerdings nicht die Begegnung mit einem fremden Menschenschlag geistig befruchtend gewirkt haben, denn zu dieser Zeit lebte in Afrika neben dem Homo sapiens sonst keine Menschenart mehr. Aber vielleicht 50 000 Jahre vor heute, überlegt Klein, könne eine genetische Mutation aufgekommen sein, die sich auf Hirnfunktionen ausgewirkt habe, was dann den Geist beflügelte. ▷

Die bis zu 35 000 Jahre alten lebendigen Tierszenen in der Grotte Chauvet an der Ardèche in Südfrankreich mögen die bisher wohl frühesten bekannten Höhlenmalereien sein. Allerdings sind dies nicht die ältesten Zeugnisse symbolischen Ausdrucks. Noch ältere Belege frühen modernen Denkens liefern Funde in Afrika und Australien.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Als wichtigsten Beleg für diese These nennt Klein Funde aus der »Zwielichthöhle«, Enkapune Ya Muto, im Rift Valley in Kenia. Das Alter dieser Artefakte besagt, dass in Afrika das Späte Steinzeitalter vor 45 000 bis 50 000 Jahren begann. Stanley H. Ambrose von der Universität von Illinois in Urbana-Champaign und sein Team fanden dort in 43 000 Jahre alten Schichten aus der Späten Steinzeit daumennagelgroße Schaber und Messer aus Obsidian. Die bemerkenswertesten Objekte aber sind nur zentimetergroße, scheibenförmige Perlen aus Straußeneischale mit einem Loch in der Mitte. Buschleute in Botswana verwenden noch heute Ketten aus ähnlichen Perlen als Tauschgeschenke. Darum meint Ambrose, die Perlen von Enkapune Ya Muto könnten zu ebensolchen Zwecken gefertigt worden sein. Jene frühen Menschen hätten sie wohl weitergereicht, um mit anderen Gruppen freundliche Beziehungen zu pflegen, die ihnen in schlechten Zeiten zugute kamen. Klein führt den Gedanken weiter und meint, dass eine genetisch gestützte Begabung für symbolische Kommunikation auch eine Grundlage für andere Veränderungen gewesen sei. Der Umgang mit Symbolik – zusammen mit einer gesteigerten Kognition, die diesen Menschen erlaubte, ihre Jagdtechnologie weiterzuentwickeln und die Umweltressourcen besser zu nutzen – habe unserer Art lange nach ihrem Erscheinen nun auch dazu verholfen, ihren Mutterkontinent Afrika zu verlassen und die Welt zu erobern.

Die Theorien über ein zündendes Ereignis, das die menschliche Kulturentwicklung in Gang brachte, werden in letzter Zeit zunehmend angezweifelt. Immer mehr Wissenschaftler halten wenig von der Vorstellung, dass das Gehirn länger zur Menschwerdung brauchte als der Knochenbau. Nach ihrer Ansicht entstand auch das menschliche Verhalten nicht schlagartig, sondern bildete sich allmählich in einer längeren Evolution heraus. Manche Vertreter dieser These vermuten sogar, dass schon andere Menschenarten, auch der Neandertaler und vielleicht bereits dessen Vorfahren, zumindest anfingen, modern zu denken (siehe auch: »Der Urmensch von Thüringen«, Spektrum der Wissenschaft 10/2004, S. 38).

Dabei ist die Idee, unsere Kreativität habe ihre Wurzeln tief in der Urzeit, gar nicht so neu. Seit Jahren geraten die Experten über eine kleine Anzahl von teils weit über 40 000 Jahre alten Funden ins Grübeln – denn diese Objekte könnten

Wann und warum entstand modernes Verhalten?

Theorien zu den Anfängen des modernen Denkens:
Trotz wesentlich früherer Anfänge verdichten sich Spuren von Modernität erst für die Zeit vor 40 000 Jahren. Begann damals eine neue Ära? Warum wurden symbolischer und künstlerischer Ausdruck plötzlich für mehr Menschen selbstverständlich?

Früher Ursprung von Symbolismus (Christopher Henshilwood, Universität Bergen): Die entscheidende Wende trat damit ein, dass die Menschen Möglichkeiten fanden, Inhalte extern festzuhalten – etwa durch Schmuck, Kunst, Sprache oder Werkzeuge. Die intellektuellen Voraussetzungen für Symbolik besaß der moderne Mensch von Anbeginn, seit mindestens 195 000 Jahren. Hin und wieder brach dieses Vermögen auch durch. Doch dessen volles Potenzial trat erst hervor, als Symbole zur Grundlage für organisiertes Verhalten wurden, wie es Handel und soziale Bündnisse erfordern.

Naturkatastrophe (Stanley H. Ambrose, Universität von Illinois): Nach genetischen Befunden ging die Population des Homo sapiens vor 70 000 Jahren fast zu Grunde. Etwa zu der Zeit brach auf Sumatra der Mount Toba aus. Das könnte sechs Jahre Winter und dann tausend Jahre Eiszeit bewirkt haben. Am ehesten überlebten damals Menschen, die miteinander – auch mit Angehörigen fremder Gruppen – kooperierten und Ressourcen teilten. Neben dem eigenen Trupp zählte nun auch der Stamm.

Geschosswaffen (John Shea, Staatsuniversität von New York in Stony Brook): Speerschleudern, vielleicht auch Pfeile, die vor 45 000 bis 35 000 Jahren aufkamen, erlaubten, Großwild – und auch Menschen – aus sicherer Entfernung zu töten. Der Anreiz zum Zusammenschluss in weiteren sozialen Netzen wuchs, was wiederum den Austausch von Nachrichten förderte.

Populationsdruck (Alison Brooks, G.-W.-Universität in Washington, DC; Sally McBrearty, Universität von Connecticut in Storrs u. a.): Vor einer kritischen Bevölkerungsdichte flackerte modernes Verhalten selten auf. Erst die Konfrontation mit anderen Gruppen und der Wettstreit um Ressourcen entflammten Symbolik und technische Neuerungen. Weil jetzt mehr Menschen die neuen Traditionen weitergaben, erhielten die sich leichter.

Mutation im Gehirn (Richard G. Klein, Stanford-Universität, Kalifornien): Eine genetische Mutation, die sich vor ungefähr 50 000 Jahren ereignete, veränderte etwas Grundlegendes im Gehirn. Fortan konnten diese Menschen symbolisch denken und eine Symbolsprache entwickeln. Anderen ohne dieses Vermögen waren sie klar überlegen und verdrängten sie bald.



Wie die Muscheln stammt dieses offenbar geglättete, mit einer Steinspitze eingeritzte Ockerstück aus der Blombos-Höhle an Afrikas Südküste.

bedeuten, dass modern anmutendes Verhalten lange einsetzte, bevor der Homo sapiens in Frankreich Höhlen ausmalte.

Zu diesen spektakulären Hinweisen gehören: ein mehrere hunderttausend Jahre altes Lager bei Bilzingsleben in Thüringen, das jahrelang bewohnt gewesen sein muss; ein Jagdplatz am Harzrand bei Schöningen in Niedersachsen, an dem sieben 400 000 Jahre alte, schlanke, technisch perfekte Wurfspeere aus Fichtenholz freigelegt wurden (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/2004, S. 48); ein 233 000 Jahre altes wie ein Figürchen anmutendes kleines Objekt aus Berekhat Ram in Israel (Golan); ein mindestens 60 000 Jahre altes Stück Feuerstein mit eingeritzten konzentrischen Bögen aus Quneitra im syrisch-israelischen Grenzgebiet; zwei 100 000 Jahre alte Fragmente eines womöglich absichtlich eingekerbten Knochens aus der Klasies-River-Mouth-Höhle in Südafrika; sowie ein poliertes Plättchen aus Mammutzahn, das aus Tata in Ungarn stammt und auf 50 000 bis 100 000 Jahre datiert wird.

Allerdings ist die Interpretation mancher dieser Funde noch strittig. Teilweise wurde auch das ermittelte Alter angezweifelt. Anzeichen dafür, dass bei diesen Objekten schon Menschen mit höherem Intellekt am Werk gewesen sein könnten, begegneten Skeptiker gern mit dem Einwurf, Einzelfälle seien nicht repräsentativ, sondern allenfalls Leistungen einzelner Genies, die es immer mal gegeben haben könne.

Angesichts neuerer Funde in Afrika hat es diese Position inzwischen nicht mehr leicht. Immer mehr Hinweise von dem Kontinent deuten darauf hin, dass der Wandel hin zum modernen Denken lange vor dem afrikanischen Späten Steinzeitalter einsetzte. Wie die Anthropologinnen Sally McBrearty von der Universität von Connecticut in Storrs und Alison S. Brooks von der George-Washington-Universität in Washington, DC, im Jahr 2000 darlegten, erschienen in Afrika die einzelnen Aspekte modernen Verhaltens nicht etwa gemeinsam in der Zeit vor 50 000 bis 40 000 Jahren, sondern zeitlich und räumlich gestreut Zehntausende von Jahren früher an ganz verschiedenen Fundstellen aus der Mittleren Steinzeit.

So entdeckten Brooks und John Yellen von der Smithsonian Institution in Washington gleich an drei Orten bei Katanda in der Demokratischen Republik Kongo Knochenharpunen aufwändiger Machart (Bild S. 45 oben). Die Forscher datieren diese Harpunen auf mindestens 80 000 Jahre, also eindeutig in die Mittlere Steinzeit. Vergleichbare Harpunen kennt man von Europa erst aus dem Jungpaläolithikum. Das betrifft sowohl die ausgeklügelte Form wie auch das Material: Bisher galt, dass die Rohstoffe Knochen und Elfenbein in Afrika erst in der Späten Steinzeit beziehungsweise in Europa im Jungpaläolithikum für Jagdwaffen und Werkzeuge verwendet wurden.

Bei den Harpunen von Katanda fanden sich Reste großer Nilwelse. Brooks und Yellen meinen, dass jene Menschen ▷

bildhafte Darstellungen
Perlen
kleine Steinklingen
Spitzen mit Widerhaken
Abbau von Gestein
Knochengeräte
gewollte Ritzungen auf Objekten
Fischfang
weiträumiger Tausch von Objekten
Erbeuten von Muscheln und Wasserschnecken
Spitzen
Verarbeitung von Pigmenten
Mahlsteine
Klingen

500 280 240 200 160 120 80 40 heute
Jahrtausende vor heute

ALISON KENDALL, NACH: SALLY MCBREARTY UND ALISON S. BROOKS, JOURNAL OF HUMAN EVOLUTION, 2000, BD. 39, S. 453–563

Wichtige steinzeitliche Errungenschaften: Das linke Ende der Balken markiert jeweils den frühesten bekannten Zeitpunkt für revolutionierende Neuerungen.

auf Fischfang gegangen sein müssen, wenn die Welse ihre Laichplätze aufsuchten. Bislang hatte man nur späteren Menschengruppen zugetraut, sich bei der Wahl von Jagdgründen nach den Jahreszeiten zu richten.

Ein weiteres Beispiel sind offensichtliche Schlachtreste gefährlicher großer Tiere von Grabungsstätten in der Kalahari in Botswana, deren Alter auf 77 000 Jahre bestimmt wurde. Die Bewohner des Lagers bei ≠Gi scheinen regelmäßig Zebras und Warzenschweine erlegt zu haben (»≠« steht für einen Klicklaut der Buschmannsprache). Keiner behaupte mehr, diese Menschen seien noch nicht so versierte Jäger gewesen wie die Spätsteinzeitler. Vielleicht manipulierten sie sogar schon die Vegetation. Hilary J. Deacon von der Universität Stellenbosch (Südafrika) jedenfalls vermutet, dass in der Gegend vor über 60 000 Jahren absichtlich Grasflächen in Brand gesteckt wurden: Feuer fördert die Keimung nahrhafter Knollengewächse.

Manche Spuren, die einige Forscher als Zeugnisse modernen Verhaltens bewerten, sind sogar noch älter als der Homo sapiens. Erst im Sommer 2004 legte das Team um McBrearty in Kenia beim Baringo-See über 510 000 Jahre alte Steinklingen frei, die eigentlich als typisch für das Jungpaläolithikum gelten. Nicht weit von dieser Stelle stießen die Forscher in mindestens 285 000 Jahre alten Schichten auf große Mengen roten Ockers. Dazu fanden sie Mahlsteine zum Zerreiben des Eisenerzes. McBrearty ist davon überzeugt, dass man hier zu symbolischen Zwecken Pigmente gewann. Zum Beispiel könnten sich die Menschen damit angemalt haben, ein oft noch heute üblicher Brauch. Auch ein über 200 000 Jahre alter Schauplatz in Sambia in der Twin-Rivers-Höhle zeugt von früher Ockerverarbeitung.



BEIDE: CHRISTOPHER HENSHILWOOD, AFRICAN HERITAGE RESEARCH INSTITUTE UND UNIVERSITÄT BERGEN



Vor 75 000 Jahren, in der afrikanischen Mittleren Steinzeit, bot die Gegend um die Blombos-Höhle (oben) Menschen beste Lebensbedingungen: mildes Klima, Süßwasserquellen, reichlich Wild und Meeresfrüchte. Seit 1997 graben Christopher Henshilwood und seine Mannschaft dort nach Zeugnissen aus der Mittleren Steinzeit.

Der unerwartete Fund

Kaum weniger erstaunen Anzeichen für weiträumige Tauschgeschäfte: In der Mumba-Höhle in Tansania lagerten zwischen 130 000 Jahre alten anderen Gerätschaften auch Klingen aus Obsidian, der von einem ungefähr 320 Kilometer entfernten Vulkanfeld stammte. Doch die Deutungen dieser Funde werden nicht allgemein anerkannt. Teils bezweifeln Forscher wiederum die Datierungen. In anderen Fällen halten sie die Interpretationen für voreilig. Zum Beispiel führen sie an, die Leute könnten Ocker auch benutzt haben, um Klingen an einen Holzschaft zu kleben. Oder man habe damit Felle oder Häute eingerieben und so desinfiziert.

Die Muschelperlen aus der Blombos-Höhle in Südafrika heizen nun die Diskussion um die Evolution des menschlichen Geistes aufs Neue an. Christopher Henshilwood entdeckte die Ablagerungen am Indischen Ozean an der Steilküste nahe der Stadt Still Bay 1991 als Doktorand. Eigentlich suchte er nach Zeugnissen von viel jüngeren Jäger-und-Sammler-Kulturen. Doch für Artefakte aus den letzten etwa zehntausend Jahren erwies sich der Ort als wenig ergiebig.

Der Forscher erkannte damals schon, dass hier reiches Material aus der Mittleren Steinzeit lag, doch das zu bergen, hätte den Rahmen seiner Arbeit gesprengt. Erst 1997 konnte er die erste Grabungskampagne durchführen. Was hier seitdem an hoch entwickelten Werkzeugen und symbolischen Gegenständen zum Vorschein kam, offenbart einen Blick auf Menschen, deren Denken offenbar schon vor langer Zeit dem unseren glich.

Mehrere Datierungsmethoden ergaben für die betreffenden Schichtungen ein Alter von etwa 75 000 Jahren. An fortschrittlichen Artefakten fand das Grabungsteam unter anderem vierzig Knochenwerkzeuge, darunter einige feine Ahlen. Zu Tage kamen auch hunderte zweischneidige Spitzen aus Silcrete (einem Kieselkonglomerat) und anderen schwer bearbeitbaren Gesteinen. Sie könnten etwa zur Antilopenjagd benutzt worden sein. Einige davon sind nur wenige Zentimeter lang und waren vermutlich die Spitze von Geschosswaffen.

Zudem finden sich in der Blombos-Höhle Skelettreste von großen Meeresfischen, die sicherlich über 30 Kilogramm wogen. Solche Knochen lagern bis hinunter in womöglich über 130 000 Jahre alten Schichten. Das bedeutet, dass sich jene Südafrikaner schon früh darauf verstanden, selbst große Fische aus dem Meer zu holen.

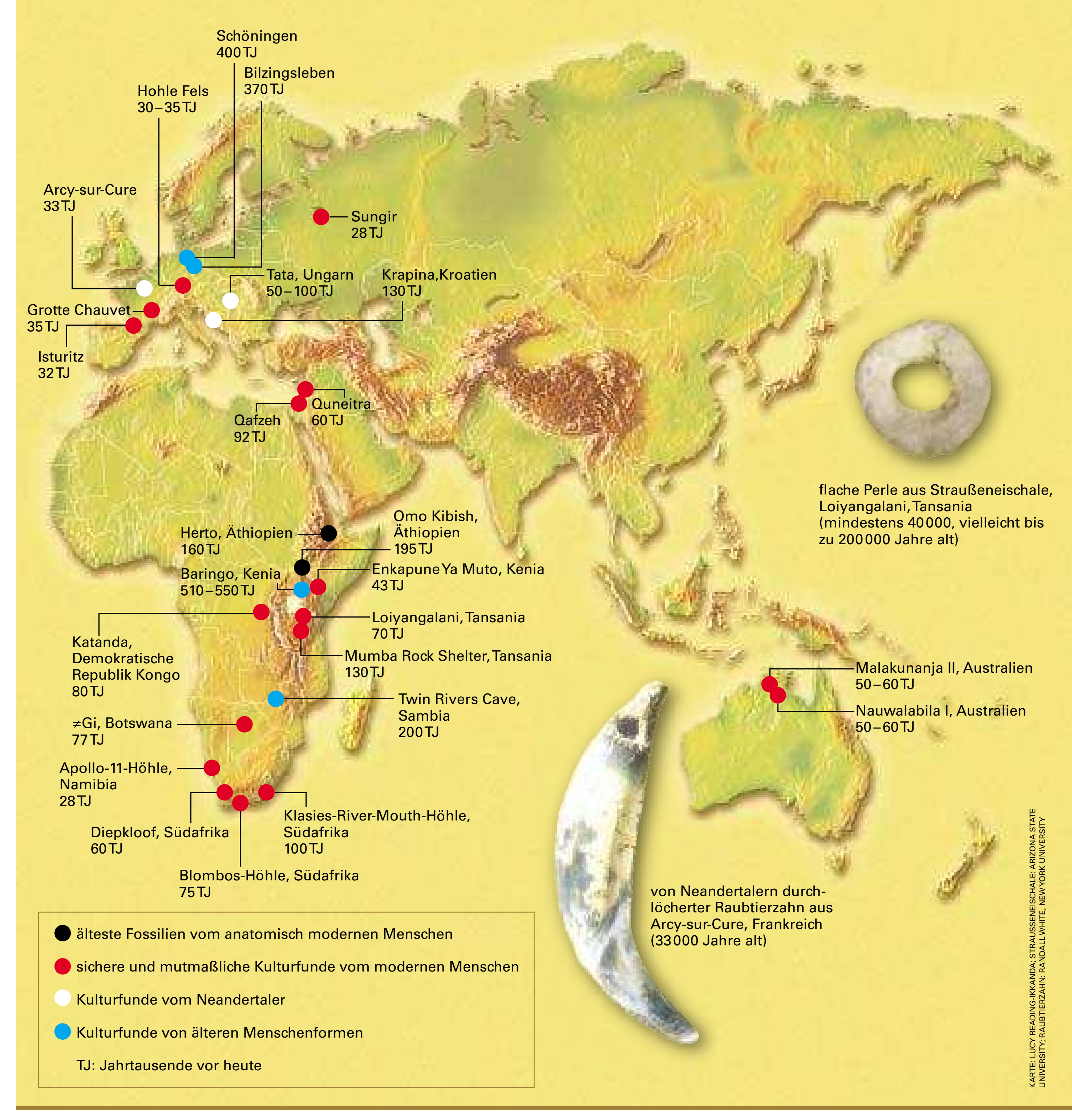
Die Höhle mag einer Familiengruppe als Wohnstätte gedient haben. Es gab Herdstellen, und die Ausgräber fanden Zähne sowohl von Erwachsenen als auch von Kindern. Verwunderlich erscheint die Menge an Steinspitzen, die zudem von ganz unterschiedlicher Qualität sind. Henshilwood spekuliert, ob die Bewohner der nicht besonders geräumigen Behausung hier eine Werkstatt unterhielten, in der auch die Jugend angeleitet wurde.

Gab es noch andere Traditionen? Die Zeugnisse für symbolisches Denken sind sicherlich die spektakulärsten Funde aus der Blombos-Höhle. Bisher können die Forscher vorweisen: ein Stück eines gekerbten Knochens; neun Brocken roten Ockers mit künstlich wirkenden Einritzungen (siehe Bild S. 41); und mehrere Dutzend von den kleinen, gelochten Schneckenhäusern. Dies alles fand sich in derselben 75 000 Jahre alten Schicht. Hingegen könnten Sedimente, die große Mengen an verarbeitetem Ocker aufwiesen, zum Teil in Form von Malkreide, über 130 000 Jahre alt sein.

Weit über Europa hinaus

Schon vor 195 000 Jahren lebten in Ostafrika Menschen, die so aussahen wie wir. Trotzdem schien es lange, als wären modernes Denken und Verhalten erst vor etwa 40 000 Jahren aufgetreten – und zwar in Europa, wo es offenbar stark aufblühte, als der anatomisch moderne Mensch den Kontinent erreichte. Andere Kontinente, insbesondere Afrika, liefern jedoch viel ältere Zeugnisse für symbolhaftes Handeln. Geistig dürften uns Menschen demnach mindestens seit der Anfangszeit des modernen Homo sapiens geglichen haben. Möglicherweise verfügten sogar schon die gemeinsamen Vorfahren des Neandertalers und des modernen Menschen über ein Potenzial für symbolhaftes Verhalten. Mindestens einige der letzten Neandertaler scheinen es auch genutzt zu haben.

(Die Karte zeigt im Text erwähnte Fundstellen.)



flache Perle aus Straußeneischale, Loiyangalani, Tansania (mindestens 40 000, vielleicht bis zu 200 000 Jahre alt)

von Neandertalern durchlöcherter Raubtierzahn aus Arcy-sur-Cure, Frankreich (33 000 Jahre alt)

KARTE: LUCY READING-IKKANDA; STRAUSSENEISCHALE: ARIZONA STATE UNIVERSITY; RAUBTIERZAHN: RANDALL WHITE, NEW YORK UNIVERSITY



GERALD NEWLANDS

◀ Ältestes afrikanisches Zeugnis für Malerei: Es stammt aus der Apollo-11-Felshöhle in Namibia (28 000 Jahre alt).

▶ Abgeschabter, hitzebehandelter roter Ocker aus der Qafzeh-Höhle in Israel: Möglicherweise wurde er bei einem Bestattungsritus verwendet (92 000 Jahre alt).

GAVRIEL LARON & ERELLA HOVERS, ARCHÄOLOGISCHES INST. DER HEBRÄISCHEN UNIV. JERUSALEM

▷ Vielleicht werden die Archäologen die Bedeutung der Gravuren auf den Ockerbrocken nie herausfinden. Zumindest wirkt es so, als hätte der Erschaffer in sie einen Sinn hineingelegt. Francesco d'Errico von der Universität Bordeaux leitete eine gründliche Untersuchung von zweien dieser Stücke. Demnach wurden die Objekte an einer Seite geglättet. In diese Fläche ritzte dann jemand mit einer Steinspitze lange, schräge Striche. Das Muster auf dem größten Brocken weist viele feine, sich kreuzende Linien auf, die von kräftigeren Ritzen umrahmt und durchquert sind (siehe Bild S. 41).

Aus den kleinen Schneckenhäusern gelochte Perlen zu arbeiten, muss ebenfalls recht mühsam gewesen sein. Die Schalen stammen von der Netzreusenschnecke *Nassarius kraussianus*, einer Sandschnecke, die laut Henshilwood wohl an einer von zwei an die zwanzig Kilometer entfernten noch heute vorhandenen Flussmündungen gesammelt wurde. Die Forscher haben versucht, die steinzeitliche Technik nachzuahmen. Anscheinend durchstießen oder durchbohrten die Höhlenbewohner die zarte Gehäusewand mit Knochenspitzen von innen her. Das erforderte offenbar einiges Geschick: Den ungeübten Nacheiferern von heute ging der größte Teil der Schalen zu Bruch. Dass die durchlochten Schnecken anschließend aufgefädelt wurden, lassen Abnutzungsspuren an den Lochrändern vermuten. Ockerreste an den Schalen könnten daher stammen, dass man die Perlen auf der bemalten Haut trug.



HARRY TYLER, AFRICAN HERITAGE RESEARCH INSTITUTE UND UNIVERSITÄT BERGEN

▲ Interessanterweise besaßen die Blombos-Bewohner ausgefeilteres Werkzeug als in der Mittleren Steinzeit üblich. So stellten sie Ahlen mit langer, feiner Spitze her, die sie mit Ocker polierten.

Kulturentwicklung nur unter Druck

McBrearty erklärte die Funde aus der Blombos-Höhle zum »schlagenden Beweis« für die Höhe der geistigen Entwicklung von Menschen der afrikanischen Mittleren Steinzeit. Zu den Kritikern von Henshilwoods Deutung gehört Randall White von der New York University, ein Experte für Körperschmuck im Jungpaläolithikum (siehe auch seinen Artikel »Bildhaftes Denken in der Eiszeit«, Spektrum der Wissenschaft 3/1994, S. 62). White hält die Löcher und Abriebspuren an den Muschelschalen einfach für natürliche Beschädigungen.

Sollte er jedoch irren, würden diese Objekte der Idee von einem frühen und allmählichen Erscheinen des modernen Denkens mächtigen Auftrieb geben. Diese Position stärken eine Anzahl neuerer Funde, darunter eingeritzte Schalenstücke von Straußeneiern, die bei Diepkloof in Südafrika auftauchten und auf rund 60 000 Jahre datiert wurden, oder Perlen aus Straußeneischale von Loiyangalani in Tansania mit einem geschätzten Alter von ungefähr 70 000 Jahren (siehe Kasten S. 43).

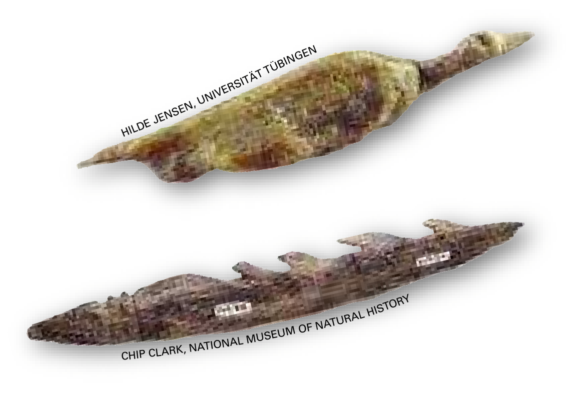
Bisher allerdings liefern die meisten Schauplätze des afrikanischen Mittleren Steinzeitalters allenfalls einzelne Spuren, die für ein fortschrittliches Denken in dieser Zeit sprechen könnten. Beispielsweise enthielten mehrere andere südafrikanische Fundorte zwar zweischneidige Spitzen, brachten aber keine Hinweise auf symbolisches Schaffen. Andererseits muss das nicht heißen, dass solches Verhalten noch nicht existierte. Jene Menschen könnten sich mittels anderer, vergänglicherer Materialien als Stein oder Kalkschalen geschmückt oder künstlerisch ausgedrückt haben.

Ohnehin könnte das Bild von der afrikanischen Steinzeit in dieser Hinsicht verzerrt sein – nicht nur, weil bestimmte Objekte eher erhalten blieben als andere, sondern auch, weil es für die fragliche Phase nur vergleichsweise wenige Grabungsstellen gibt. Vor diesem Hintergrund sei genau der Eindruck zu erwarten, den die Fundlage offenbar vermittelt – so könnten diejenigen argumentieren, die von einer graduellen Entwicklung des Geistes ausgehen. Denn insgesamt sieht es so aus, als wäre modernes Denken zunächst nur hin und wieder aufgeflackert, eben weil der anatomisch moderne Homo sapiens von Anfang an höhere geistige Fähigkeiten besaß, sie aber nur nutzte, wenn ihm das Vorteile brachte.

Und zwar könnten es am ehesten die Begleitumstände einer höheren Bevölkerungsdichte gewesen sein, die kulturellen Fortschritt erzwangen, spekulieren McBrearty und einige andere Forscher. Bei mehr Menschen werden die Ressourcen knapper. Verknappung und Wettbewerb veranlasste die Leute, sich gewiefte Methoden der Nahrungsbeschaffung, Rohstoffgewinnung und Materialbearbeitung auszudenken. Auch begegneten sich Menschengruppen nun öfter. Bemalte Körper, Perlenschmuck, ja selbst kunstvoll gefertigtes Gerät könnten die Klanzugehörigkeit und den Rang von Personen angezeigt und auch in harter Zeit den Zugang zu Ressourcen geregelt haben.

Nicht zuletzt ist wie erwähnt vorstellbar, dass hübsche Dinge wie Perlen Freundschaften auch durch schlechte Zeiten trugen. »Wer sich mit seinen Nachbarn gut stellt, gewinnt Verbündete«, sinniert Henshilwood. »Der Austausch von Geschenken hilft dabei.« Vielleicht erklärt das, wieso einzelne Stücke von der Blombos-Höhle so kunstvoll





Elfenbeinskulptur eines Wasservogels, aus der Hohle-Fels-Höhle auf der Schwäbischen Alb (oben): Dies ist eine der frühesten figürlichen Darstellungen (bis zu 35 000 Jahre alt); Knochenharpune aus Katanda, Demokratische Republik Kongo (80 000 Jahre alt)

gefertigt sind. Wie Henshilwood bemerkt, wird ein Gerät oder eine Waffe durch Schönheit nicht unbedingt funktionaler. Aber ihr Geschenkwert, die symbolische Bedeutung, steigt.

Im Gegenzug könnten fortschrittliche Praktiken wieder untergegangen sein, wenn die Bevölkerung schrumpfte. Vielleicht starben die betreffenden Gruppen tatsächlich aus. Denkbar ist aber auch, dass das Wissen um manche Fertigkeiten verloren ging, einfach weil sie nichts mehr einbrachten. Ein Beispiel dazu aus heutiger Zeit geben die Tasmanier ab: Als die Europäer im 17. Jahrhundert auf das Inselvolk trafen, erwies sich dessen materielle Kultur in vielem als deutlich primitiver als die der australischen Ureinwohner. Doch archäologische Funde zeigen, dass die Tasmanier einige tausend Jahre vorher technologisch auf der Höhe ihrer Zeit gewesen waren. Die Insel von der Größe Irlands verlor den Kontakt zum australischen Festland vor über 10 000 Jahren, als der Meeresspiegel stieg. Offenbar bewirkte die Isolation für Tasmanien einen kulturellen Rückgang.

In Südafrika fällt auf, dass Fundorte, die zwischen 60 000 und 30 000 Jahre alt sind, sehr wenig Spuren von Modernität liefern. Die Region erlebte vor etwa 60 000 Jahren einen Klimasturz. Wie Nachforschungen ergaben, brach damals die Population ein. Womöglich hing der mutmaßliche kulturelle Rückschritt hiermit zusammen. White warnt aber davor, Menschen zu schnell geistige Fähigkeiten abzusprechen, nur weil sie manche Technologien nicht beherrschen. Dass die Menschen im Mittelalter noch nicht zum Mond flogen, lag nicht an mangelnder Intelligenz. »Zu ▷

32 000 Jahre alt ist die Knochenflöte aus Isturitz in Frankreich. Vor 28 000 Jahren wurden bei Sungir in Russland mehrere Personen eingehüllt in eine Kleidung bestattet, die mit Tausenden von Perlen aus Mammutelfenbein verziert war.





FLÖTE: ART RESOURCE NEW YORK / FOTO R.M.N.; GRAB: NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION, KENNETH GARRETT

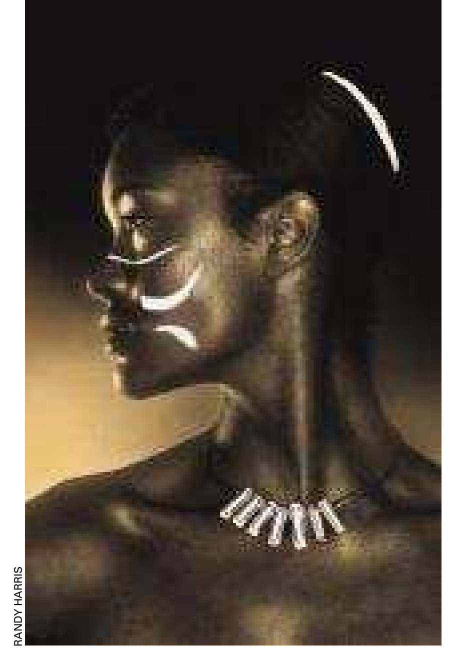
▷ keinem Zeitpunkt«, so White, »entfalten Menschen ihr volles Potenzial.« Die Wissenschaftler sind sich nicht einmal einig, was letztlich modernes Verhalten ausmacht. Eine enge Sicht würde den Begriff eher auf jüngere Errungenschaften eingrenzen, die heute unser Leben bestimmen, vielleicht angefangen bei der Landwirtschaft und bis hin zu neuen Erfindungen wie dem Handy. Archäologen fassen den Begriff weiter. Viele von ihnen orientieren sich dabei an den Anfängen des Jungpaläolithikums in Europa, andere an den materiellen Kulturen von Jäger-und-Sammler-Völkern in historischer und heutiger Zeit.

Australien vor Europa

Ein anderer Ansatz nimmt als Anhaltspunkt symbolisches Verhalten – einschließlich der Sprache –, also das anerkannt herausragende Kennzeichen moderner Gesellschaften. »Dass wir Symbole extern, außerhalb des Gehirns, bewahren können, ist der Schlüssel zu allem, was wir heute machen«, betont Henshilwood. Zwar muss sich Modernität im archäologischen Befund nicht zwangsläufig durch ein symbolbasiertes Kommunikationssystem ausdrücken, wie auch das Beispiel Tasmanien zeigt. Aber zumindest scheinen die Forscher das Vorhandensein von Symbolik als klares – wenn nicht sogar entscheidendes – Kriterium für eine moderne Denkweise anzuerkennen.

Wie früh in der menschlichen Kulturgeschichte Symbolik auftrat, bleibt noch zu klären. Auf interessante Weise beleuchten neben Afrika und Europa andere Weltregionen das Geschehen, zum Beispiel Australien. Strittig ist noch, ob moderne Menschen diesen Kontinent wirklich schon vor 60 000 Jahren erreichten. Den Datierungen zufolge benutzten sie bereits bald danach in nordaustralischen Felshöhlen in Malakunanja II und Nauwalabila I Ockerfarbe. Wenn diese Menschen von Südostasien gekommen waren, hätten sie selbst in Phasen niedrigen Meeresspiegels zumindest 80 Kilometer über das Meer fahren müssen und dazu genügend haltbare Fahrzeuge benötigt. Fast alle Experten sind sich einig, dass für diese Leistung ein moderner Verstand unabdingbar war.

Bei fast 92 000 Jahre alten Gräbern von Homo sapiens in der israelischen Qafzeh-Höhle stießen Erella Hovers von der Hebräischen Universität in Jerusalem und ihre Mitarbeiter auf Dutzende von roten Ockerstücken. Die Forscher vermuten, dass man diese Pigmentklumpen in Feuerstellen erhitzte, wodurch sie scharlachrot wurden. Dann fanden sie angeblich bei den Begräbnisritualen Verwendung.



▶ **Das Schmücken des Körpers – und allgemeiner der Umgang mit Symbolik – gilt weithin als Zeichen für modernes Verhalten.**

RANDY HARRIS

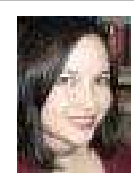
Muss man für die Anfänge des menschlichen Geistes noch weiter zurückgehen? Erschien symbolhaftes Verhalten sogar schon vor dem Auftritt des anatomisch modernen Menschen? Aus den vielen Fundstellen zu schließen, verwendeten die Neandertaler regelmäßig Ocker. Und im frühen Jungpaläolithikum, als ihre Zeit zu Ende ging, entwickelten sie anscheinend eine eigene Tradition für Körperschmuck (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2000, S. 42). Sie begruben auch ihre Toten. Ob das allerdings zugleich symbolische Bedeutung hatte, ist aber nicht sicher, denn es fanden sich keine Grabbeigaben. Kürzlich jedoch untersuchte Jill Cook vom Britischen Museum in London Spuren an Neandertaler-Skelettteilen aus der Krapina-Felshöhle in Kroatien und kam zu dem Ergebnis, dass die Knochen nicht zur Fleischgewinnung, sondern bei einer Art Leichenritual gesäubert worden sein müssen.

Die große Frage ist, ob die Anlage für symbolisches Denken bei Neandertalern und modernen Menschen jeweils unabhängig entstand – oder ob bereits ein gemeinsamer Vorfahre von beiden die entsprechenden Voraussetzungen besaß. Whites Ansicht hierzu ist deutlich: »Beweisen kann ich es nicht, aber ich wette, der Heidelbergensis war dazu schon fähig« (somit Menschen, die in Europa oder auch Nordafrika vor über einer halben Million Jahren lebten).

Henshilwood glaubt dagegen, dass das symbolhafte Denken in Afrika in der Mittleren Steinzeit seinen Anfang nahm, das heißt mit dem anatomisch modernen Menschen. In neun Grabungskampagnen in der Blombos-Höhle haben er und seine Mitarbeiter etwa ein Drittel der Sedimente von vor 75 000 Jahren akribisch durchsiebt. Der Rest soll für zukünftige Grabungstechniken und neue Datierungsmethoden unangetastet bleiben. »Statt jetzt hier weiterzuarbeiten«, meint Henshilwood, »ist es nun wichtiger, andere Stellen aus dieser Zeit zu finden.« Viel versprechend erscheinen mehrere Orte im De-Hoop-Naturreservat etwas weiter westlich an der Küste.

Wie ich die zarten Schneckenhäuser in meiner Hand so anschaue, versuche ich mir auszumalen, was sie den Menschen damals wohl bedeuteten. Mir fällt die Vorstellung nicht leicht, dass jenes Frühvolk schon Zeit und Kraft für solche Spielereien gefunden haben soll. Als ich aber später in Kapstadt an Schmuckgeschäften mit ihren Auslagen vorbeikomme, will mir ein Homo sapiens ohne Glitzerkram noch weniger in den Sinn. Das Design mag sich in 75 000 Jahren verändert haben, die Botschaft nicht. ◁

AUTORIN UND LITERATURHINWEISE



Kate Wong ist leitende Redakteurin von Scientific-American-online.

Evolution des Menschen II. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2004

Nassarius kraussianus shell beads from Blombos Cave: Evidence for symbolic behavior in the middle stone age. Von Francesco d'Errico et al. in: Journal of Human Evolution, Bd. 48, Heft 1, S. 3, Januar 2005

The origin of modern human behavior: Critique of the models and their test implications. Von C. S. Henshilwood und C. W. Marean in: Current Anthropology, Bd. 44, Heft 5, S. 627, Dezember 2003

The invisible frontier: A multiple species model for the origin of behavioral modernity. Von Francesco d'Errico in: Evolutionary Anthropology, Bd. 12, Heft 4, S. 188, 5. August 2003

Prehistoric art: The symbolic journey of humankind. Von Randall White. Harry N. Abrams, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PLANETARIEN

Heute Abend: der Sternenhimmel

Computergesteuert lassen Dutzende von Projektoren auch bei Regenwetter die Sterne leuchten.

Von Thomas Bührke

Alle Jahre wieder zur Weihnachtszeit fragt sich so mancher, welchem Gestirn die drei Weisen aus dem Morgenland wohl gefolgt sein könnten. War es ein Komet, eine Supernova oder einfach eine seltene Planetenkonstellation? Theorien gibt es viele, die ausgefeilte Projektionstechnik der Planetarien führt sie in Sonderveranstaltungen vor Augen.

Das erste »Sternenkino« baute die Firma Zeiss 1923 für das damals neu gegründete Deutsche Museum in München. Die Bewegungen von Sternen und Planeten konnten damit besser dargestellt werden als mit den im 17. Jahrhundert ersonnenen mechanischen »Tellurien« und »Planetarien«: Das waren Konstruktionen aus Gestängen und Kugeln, die zunächst die Umlaufbahn der Erde um die Sonne, später die Bewegungen der Himmelskörper im Sonnensystem veranschaulichten.

Die moderne Technik in München erwies sich als erfolgreich, und der Besucherandrang sorgte rasch dafür, dass andere deutsche Städte nachzogen. Heute gibt es weltweit etwa 16 000 dieser Einrichtungen, die meisten in den USA, gefolgt von Japan und den europäischen Ländern.

Das Grundprinzip, das Walter Bauersfeld bei Zeiss in Jena ersann, kombiniert eine Vielzahl kleinerer Projektoren in zwei Kugeln. Die eine bildet den nördlichen, die andere den südlichen Sternenhimmel auf der Innenseite einer kuppelförmigen Projektionsfläche ab. Tatsächlich entsteht das Firmament durch Vergrößerung von Masken, in die Löcher – die Sterne – eingestanzt sind. Deren Größe entspricht der mit bloßem Auge bei optimalen Beobachtungsbedingungen wahrnehmbaren Helligkeit. Während man hierfür früher Kupferfolien benutzte, ist man heute zu chrombeschichteten Glasplatten übergegangen. Jede Sternmaske repräsentiert nur einen Ausschnitt der Himmelskugel. In der Kuppel fügen sich diese nahtfrei zum nördlichen beziehungsweise südlichen Firmament mit jeweils bis zu 4500 Sternen zusammen.

Sonne, Mond und Planeten, aber auch die Milchstraße, kosmische Nebel und Galaxien sowie die Konturen der Sternbilder liegen als hochwertige Dias vor; die Projektoren sitzen bei klassischer Bauweise in einem länglichen Verbindungsstück zwischen den Kugeln, zusammen mit den Motoren. Indem diese das Gerät um mehrere Achsen drehen, simulieren sie den Tages- oder Jahresgang, aber auch die unmerklich langsame Taumelbewegung der Erde um ihre Achse. Diese »Präzession« bewirkt, dass der Himmelspol am Firmament einen Kreis beschreibt – in etwa 2000 Jahren werden Menschen ein anderes Gestirn als Polarstern bezeichnen. Auch der Standort der Sternbeobachtung ist wählbar, moderne Systeme berechnen sogar den Blick von einem Satelliten oder einem anderen Planeten aus. Weil Sternmasken nicht veränderlich sind, stoßen die »Sternenkinos« aber bei den Eigenbewegungen der Sterne an ihre Grenzen.

Heutige Geräte besitzen über hundert Projektoren, deren Bewegung ein Computerprogramm steuert. Sie können den Himmel bis zu 10 000 Jahre in die Vergangenheit und die Zukunft simulieren, also auch die Situation in Bethlehem im Jahr 7 v. Chr. Damals standen Jupiter und Saturn übrigens ungewöhnlich nah beisammen, sodass Zeitgenossen darin einen neuen Stern erblickt haben mögen.

Kompakter als die klassische »Hantelform« ist eine etwas in die Länge gezogene Kugel: der Starball. Damit lassen sich Jahrhunderte am Sternenhimmel wesentlich schneller durchlaufen als bisher. Allerdings müssen hierfür die ursprünglich im länglichen Mittelteil untergebrachten Projektoren auf einem separaten Podest installiert werden. Nun drehen nicht mehr Motoren im Zentralteil der Hantel das gesamte Gerät, um Epochen im Zeitraffer verrinnen zu lassen. Stattdessen werden die einzelnen Projektoren rasch geschwenkt. Das spart viele Minuten Vorführzeit.

Eine kleine Revolution in der Projektionstechnik gelang vor etwa zehn Jahren den Entwicklern der Firma Zeiss, die weltweit etwa ein Drittel aller Planetarien baut: die Beleuchtung der bis zu tausend Löcher einer Sternmaske durch jeweils eine Lichtleitfaser. Das erhöht die Lichtausbeute um das Hundertfache. Die Löcher können deshalb schrumpfen, sodass sie das Auge nicht mehr als Scheibe wahrnimmt – bislang der Hauptunterschied zwischen dem echten und dem simulierten Himmel. Das Ergebnis: Die Sternenpunkte erscheinen heller und das gesamte Sternenzelt brillanter. Darüber hinaus spart man Energie. Waren früher noch Lampenleistungen um 4000 Watt nötig, reichen heute 400 Watt aus.

Angesichts der permanenten Beleuchtung unserer Städte bieten Planetarien oft die einzige Möglichkeit, die Faszination des Sternenhimmels zu erleben. Neuerdings zeigen sie auch Filme, von Laserdisplays an die Kuppel projiziert. Schnelle Drehspiegel erzeugen computergesteuert mit drei Lasern in den Farben Rot, Grün und Blau etwa acht Millionen Bildpunkte. Eine kostengünstige Alternative zur klassischen »analogen« Projektion ist das Verfahren auf längere Sicht aber noch nicht – deren Auflösung ist hundertfach, ihre Helligkeit zehnfach stärker. ◁

Thomas Bürke schreibt über Physik und Astronomie. Im September erhielt er den Hanno und Ruth Roelin-Preis für Wissenschaftspublizistik.

▶ Was immer Menschen am nächtlichen Himmel beobachten können, sollen Planetarien auch darstellen. Dazu werden gelochte »Sternmasken« und Dias auf die Innenseite einer Kuppel projiziert. Beim klassischen hantelförmigen Aufbau enthalten die beiden Kugeln Fixsternprojektoren, der längliche Teil Projektoren zum Beispiel für Planeten und Galaxien.

WUSSTEN SIE SCHON?

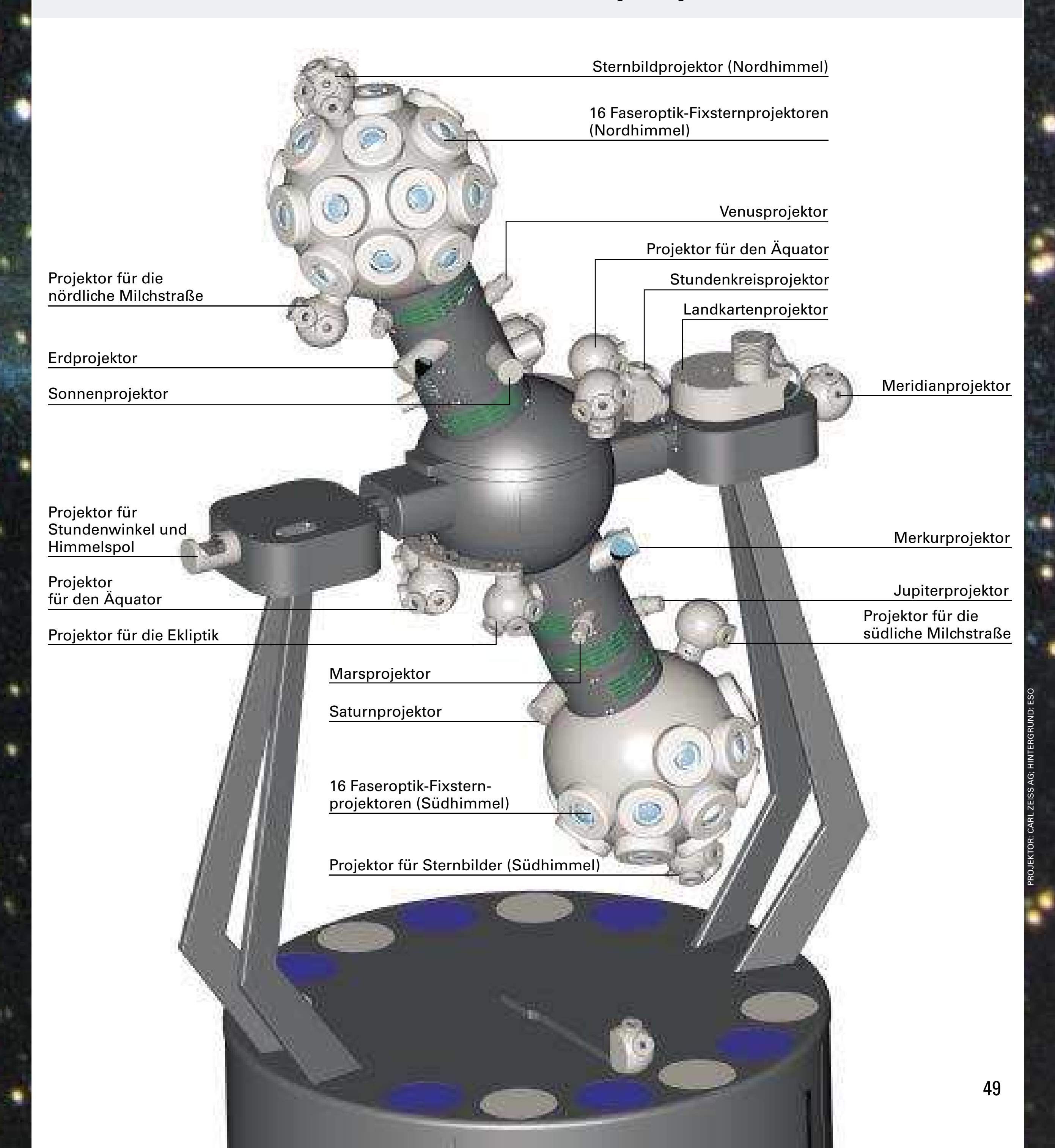
▶ **Als Planetarien bezeichnete man mechanische Gebilde**, welche die Bahnen der Planeten veranschaulichten. Diese wurden oft durch hölzerne Kugeln repräsentiert, die über Zahnräder per Hand in Bewegung gesetzt wurden. Dem heutigen Wortverständnis näher waren begehbare Kugeln, deren Innenfläche ein Sternenhimmel schmückte. Durch Drehung der Kugel simulierte man den Auf- und Untergang der Gestirne. Das älteste erhaltene Exemplar ist der 1664 fertig gestellte Gottorper Globus des Herzogs Friedrich III. von Holstein für zwölf Personen (Lomonossow-Museum, St. Petersburg).

▶ **Im so genannten Sternenstädtchen bei Moskau** trainieren russische Kosmonauten in einem speziellen Planetarium. Es simuliert bei Steuermanövern den sich drehenden Himmel.

▶ **In den 1960er Jahren** erlebten Planetarien, nach einer Phase geringen Interesses, einen Boom, ausgelöst durch die ersten Satelliten und Raumflüge der Amerikaner und Sowjets.

▶ **Echte Sterne flimmern am Nachthimmel** auf Grund von Luftbewegungen. Diesen Effekt imitieren Faseroptiken, die mit flackerndem Licht beleucht werden. Dazu wird ein strukturiertes Dia sehr schnell vor der Lichtquelle gedreht.

▶ **Zugvögel orientieren sich auch an den Sternen**, wie Ornithologen 1956 im Bremer Olbers-Planetarium zeigten. Dazu sperrten sie Garten-, Mönchs- und Klappergrasmücken in einen Käfig, der nur den Blick auf den künstlichen Sternenhimmel freigab. Wurde die Projektion gedreht, änderten auch die Tiere ihre Flugrichtung.





FOLIOART.CO.UK / JONATHAN MILNE

Erzeugnisse von Menschenhand verdrängen die natürliche Umwelt. Wirtschaftstheorien, die für eine fast leere Welt erdacht wurden, passen nicht zu einem immer dichter bevölkerten Planeten.



Wirtschaft in einer begrenzten Welt

Die expandierende Weltwirtschaft stößt an die Grenzen des planetaren Ökosystems. Um den diffusen Begriff der Nachhaltigkeit mit konkretem Inhalt zu füllen, müssen Ökonomen neue Denkansätze entwickeln.

Von Herman E. Daly

Wachstum gilt als Allheilmittel für alle wirtschaftlichen Übel der modernen Welt. Armut? Die Wirtschaft muss noch mehr Güter und Dienstleistungen produzieren und Konsumanreize schaffen, dann sickert von selbst Wohlstand von oben nach unten; bloß keine Umverteilung von Reich zu Arm, das hemmt nur das Wachstum. Arbeitslosigkeit? Die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen muss durch Senkung der Kreditzinsen und Investitionsförderung steigen, dann gibt es mehr Wachstum und somit mehr Arbeit. Überbevölkerung? Wirtschaftswachstum reduziert von selbst die Geburtenrate durch den so genannten demografischen Übergang, siehe die Industrienationen im 20. Jahrhundert. Umweltzerstörung? Das Problem erledigt sich durch die Kuznets-Kurve; diese empirische Relation garantiert angeblich, dass die Umweltbelastung mit steigendem Bruttoinlandsprodukt (BIP) zwar zunächst zunimmt, dann aber ein Maximum erreicht und schließlich sogar sinkt.

Diese Wachstumsgläubigkeit hätte manches für sich, wenn die globale Wirtschaft im leeren Raum existierte. Doch sobald die expandierende Wirtschaft das umgebende Ökosystem zu stark beansprucht, beginnen wir mehr natürliches Kapital – Fische, Mineralien oder fossile Brennstoffe – zu opfern, als wir an selbst geschaffenem Kapital – Straßen, Fabriken und Geräten – gewinnen. Dann tritt etwas ein, das ich unwirtschaftliches Wachstum nenne: Wir produzieren mehr »Ungüter« als Güter und werden ärmer statt reicher (siehe Kasten S. 53). Haben wir erst einmal die optimale Größenordnung überschritten, wird Wachstum auf kurze Sicht dumm und auf lange Sicht unmöglich. Vielleicht haben manche Industrieländer bereits diese Phase erreicht (siehe Kasten S. 55).

Diese Fehlentwicklung lässt sich nur schwer erkennen und noch schwerer vermeiden. Ein Problem ist, dass manche Leute vom unwirtschaftlichen Wachstum profitieren und daher keinen Grund sehen, etwas zu ändern. Außerdem macht die übliche volkswirtschaftliche Gesamtrechnung die Kosten des Wachstums nicht für jedermann sichtbar.

Noch bestreiten die meisten Ökonomen, dass die Wirtschaft der reichen Länder auf unwirtschaftliches Wachstum zusteuert. Sie vernachlässigen das Problem der Nachhaltigkeit und glauben, wir könnten, da wir bisher mit Wachstum so viel erreicht haben, ewig so weitermachen. Dabei hat die Sorge um Nachhaltigkeit eine lange Tradition. Das Prinzip des pfleglichen Umgangs mit der Naturressource Holz formulierte der deutsche Forstwirtschaftler Hans Carl von Carlowitz bereits im Jahr 1713. Und anno 1848 beschrieb der englische Ökonom John Stuart Mill in seinem berühmten Kapitel »Of the Stationary State« (Vom stationären Zustand) eine Situation, die er im Gegensatz zu anderen klassischen Ökonomen seiner Zeit begrüßte.

Den modernen Begriff Sustainability prägten Kenneth Boulding, Ernst Schumacher und Nicholas Georgescu-Roegen in den 1960er und 1970er Jahren. In dieser Tradition stehen die so genannten ökologischen Ökonomen, zu denen ich gehöre, sowie teilweise jene Vertreter der herrschenden Lehre, die sich auf Ressourcen- und Umweltökonomie spezialisiert haben. Doch alles in allem gilt Nachhaltigkeit unter Verfechtern der neoklassischen Orthodoxie als Marotte; die allermeisten schwören auf Wachstum.

Wachstumsgrenzen

Dabei sind die Tatsachen offensichtlich: Die Biosphäre ist endlich und wächst nicht, sie bildet ein geschlossenes System – bis auf die konstante Zufuhr solarer Energie – und unterliegt den Gesetzen der Thermodynamik. Jedes Subsystem muss irgendwann aufhören zu wachsen und ein dynamisches Gleichgewicht erreichen. Geburtenraten müssen Sterberaten entsprechen und die Produktionsraten von Gütern ihrem Verschleiß.

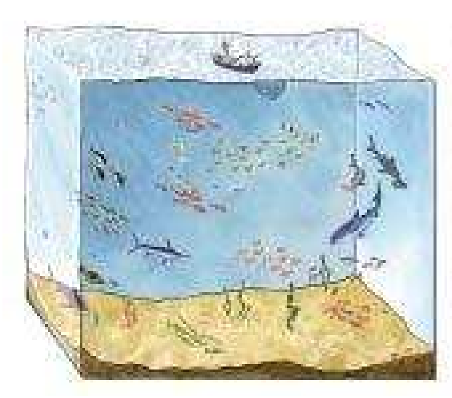
Im Lauf meiner 67 Lebensjahre verdreifachte sich die Erdbevölkerung und noch viel stärker wuchs die Masse der Produkte. Zugleich ist auch die gesamte Energie- und Materialmenge, die für ▷

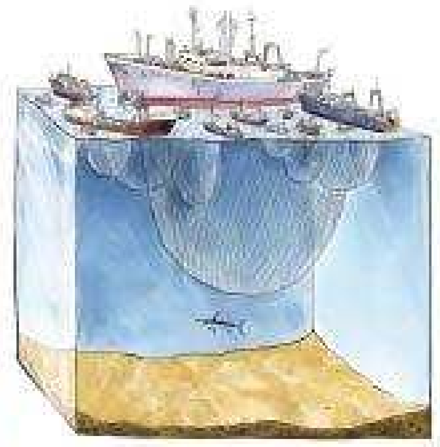
Die Welt im Jahr 2050

In diesem Heft:

Themen vom November:

Themen vom Oktober:





MATT COLLINS

◀ Von Menschenhand geschaffenes Kapital vermag natürliches Kapital nicht zu ersetzen. Einst wurde der Fischfang durch die Anzahl der Boote – produziertes Kapital – begrenzt (links). Heute bildet die Anzahl der im Meer vorhandenen Fische – natürliches Kapital – die Grenze (rechts). Der Bau zusätzlicher Schiffe steigert die Fangquoten nicht mehr. Um langfristig gesundes Wirtschaften zu sichern, müssen die Nationen auf ihr natürliches Kapital achten statt nur auf den Gesamtreichtum.

▷ Erhaltung und Ersatz der von Menschen produzierten Waren erforderlich ist, enorm gestiegen. Je mehr wir die Welt mit uns und unseren Produkten füllen, desto weniger bleibt übrig von dem, was vorher da war. Um dieser neuen Form der Verknappung Rechnung zu tragen, muss die herkömmliche Ökonomie der »leeren Welt« durch eine Theorie der »vollen Welt« ersetzt werden.

Die Mikroökonomie, welche Kosten und Nutzen einzelner Aktivitäten sorgfältig misst und abwägt, gibt Menschen und Unternehmen ein klares Signal, wann es Zeit ist, die Expansion einer Aktivität zu stoppen. Eine expandierende Tätigkeit verdrängt schließlich eine andere Unternehmung, und diese Verdrängung zählt als Kostenfaktor. Die Menschen hören mit einer Tätigkeit auf, sobald deren Grenzkosten so groß werden wie der Grenzertrag: Es lohnt sich nicht, noch einen Euro für Eiscreme auszugeben, wenn uns das weniger Befriedigung verschafft als etwas anderes für dasselbe Geld. Die herkömmliche Makroökonomie, welche die Wirtschaft als Gesamtheit untersucht, kennt hingegen keine ähnliche Stoppregel.

Da der Übergang zu einer nachhaltigen Wirtschaft einen radikalen Wandel des Denkens und Handelns von Ökonomen, Politikern und Wählern verlangt, könnte man versucht sein, das ganze Vorhaben als unmöglich abzutun. Doch die Alternative – eine unbegrenzt wachsende Wirtschaft – ist biophysikalisch unmöglich. Müsste ich zwischen einer politischen und einer biophysikalischen Unmöglichkeit wählen, würde ich Letztere für noch unmöglicher halten und alles auf Erstere setzen.

Was bleibt erhalten?

Bisher habe ich die nachhaltige Wirtschaft nur allgemein als ein System beschrieben, das angesichts biophysikalischer Grenzen auf unbestimmte Zeit zu funktionieren vermag. Um nachhaltig zu wirtschaften, müssen wir präzisieren, welche Größe von Jahr zu Jahr erhalten bleiben soll. Die Ökonomen haben fünf Kandidaten diskutiert: Bruttoinlandsprodukt (BIP), Nutzen, Durchsatz, natürliches Kapital sowie Gesamtkapital, das heißt die Summe aus natürlichem und von Menschen produziertem Kapital.

Manche meinen, eine nachhaltige Wirtschaft solle die Wachstumsrate des BIP konstant halten. Nach dieser Ansicht ist Nachhaltigkeit gleich Wachstum, und die Frage, ob nachhaltiges Wachstum biophysikalisch überhaupt möglich ist, wird gar nicht gestellt. Dies dient dem politischen Zweck, das Modewort »nachhaltig« als rhetorische Beschwichtigungsformel zu benutzen, ohne wirklich etwas damit zu meinen.

Selbst der Versuch, Nachhaltigkeit als konstantes BIP zu definieren, ist problematisch, denn das BIP wirft qualitative Verbesserung (Entwicklung) in einen Topf mit quantitativer Zunahme (Wachstum). Das nachhaltige Wirtschaftssystem muss an einem bestimmten Punkt zwar aufhören zu wachsen, aber nicht, sich zu entwickeln. Es gibt keinen Grund, die qualitative Verbesserung von Produkten zu begrenzen; dadurch kann das BIP wachsen, ohne dass die Nutzung von Ressourcen zunimmt.

DIE WIRTSCHAFTSFRAGE

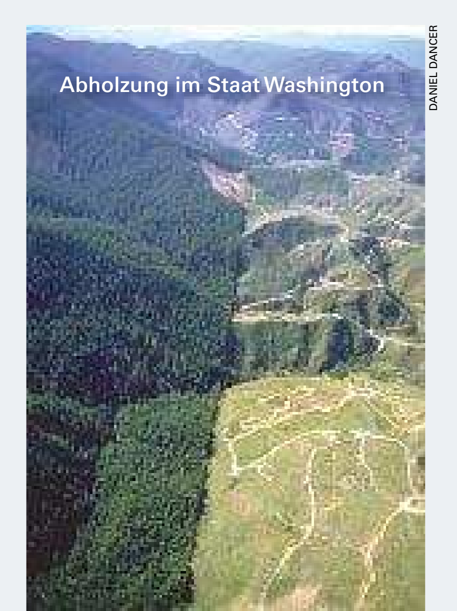
Das Problem

▶ Der wirtschaftliche Status quo lässt sich nicht mehr lange aufrechterhalten. Ohne einschneidende Veränderungen drohen uns sinkender Lebensstandard und Umweltkatastrophen.

Der Plan

▶ Die Wirtschaft muss so verändert werden, dass sie langfristig und nachhaltig funktioniert. Dabei gelten drei Regeln:

1. Die Nutzung sämtlicher Ressourcen wird auf ein Maß begrenzt, bei dem das Ökosystem den letztlich erzeugten Abfall zu absorbieren vermag.
2. Erneuerbare Ressourcen werden in einem Umfang ausgebeutet, der die Regenerationsfähigkeit des Ökosystems nicht übersteigt.
3. Nicht erneuerbare Ressourcen werden den möglichst nicht rascher aufgebraucht, als erneuerbare Alternativen entwickelt werden.



Abholzung im Staat Washington

DANIEL DANCER

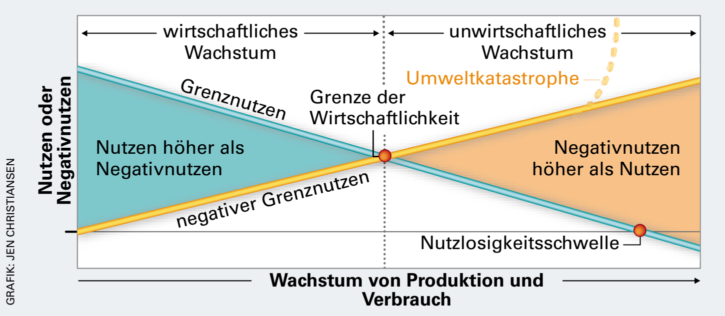


Wachstum muss nicht immer gut sein

Unwirtschaftliches Wachstum entsteht, wenn Produktionszuwächse auf Kosten von Wohlbefinden und Ressourcen gehen, deren Wert den der produzierten Waren übersteigt. Dahinter steckt ein Missverhältnis zweier Größen namens Nutzen *(utility)* und Negativnutzen *(disutility)*. Nutzen bedeutet hier das Niveau der Bedürfnisbefriedigung in der Bevölkerung – grob gesagt den Grad ihres Wohlbefindens. Negativnutzen bezeichnet die Opfer, die für das Steigern von Produktion und Verbrauch zu bringen sind. Zu solchen Opfern zählen Gebrauch der Arbeitskraft, Verlust von Freizeit, Verbrauch von Ressourcen, Umweltverschmutzung und Verkehrsstaus.

Um das Verhältnis zwischen Nutzen und Negativnutzen zu veranschaulichen, werden der so genannte Grenznutzen (grüne Linie) und der negative Grenznutzen (orange Linie) grafisch dargestellt. Grenznutzen bedeutet die Menge der Bedürfnisse, die befriedigt werden, wenn der Verbrauch eines bestimmten Quantums an Gütern und Dienstleistungen um eine zusätzliche Einheit steigt. Mit zunehmendem Verbrauch nimmt der Grenznutzen ab, da wir unsere dringendsten Bedürfnisse zuerst befriedigen. Negativer Grenznutzen bezeichnet das Ausmaß des Opfers, das zur Erzielung einer zusätzlichen Verbrauchseinheit nötig ist. Der negative Grenznutzen wächst mit zunehmendem Verbrauch, da die Menschen meist die geringsten Opfer zuerst bringen.

Die optimale Größe des Verbrauchs wird durch den Punkt markiert, an dem Grenznutzen und negativer Grenznutzen gleich sind. An diesem Punkt genießt die Gesellschaft den maximalen Nettonutzen (grüne Gesamtfläche). Wird der Konsum über diesen Punkt hinaus gesteigert, verliert die Gesellschaft in Form höheren negativen Nutzens mehr, als sie durch den zusätzlichen Nutzen gewinnt: Der negative Nettonutzen (die orange Fläche) wächst. Wachstum wird unwirtschaftlich.



GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN

Schließlich erreicht eine Bevölkerung mit unwirtschaftlichem Wachstum die Grenze der Nutzlosigkeit – das heißt den Punkt, an dem sie durch weiter erhöhten Konsum keinerlei zusätzlichen Nutzen mehr schafft. Vielleicht haben einige Industrieländer diese Grenze bereits erreicht. Außerdem kann eine Umweltkatastrophe eintreten und den negativen Nutzen steil hochtreiben (gestrichelte Linie) – und zwar vor oder nach Erreichen der Nutzlosigkeitsschwelle.

Die Grafik gibt unsere Kenntnis der Situation zu einem bestimmten Zeitpunkt wieder. Künftige Technologien könnten die Linien so verschieben, dass verschiedene Details nach rechts wandern. Dadurch würde zusätzliches Konsumwachstum möglich, bevor der Negativnutzen überwiegt.

Allerdings gilt nicht unbedingt, dass technischer Wandel stets die Grenzen erweitert. Beispielsweise hat die Entdeckung des Ozonlochs und der globalen Erwärmung – beides Folgen neuer Technologien – die Linie des negativen Grenznutzens nach oben verschoben; dadurch wandert die Grenze der Wirtschaftlichkeit nach links und schränkt die Expansion ein.

Der Grundgedanke ist ja, vom nicht nachhaltigen Wachstum zu nachhaltiger Entwicklung überzugehen.

Der nächste Kandidat für ein Nachhaltigkeitsmaß ist der ökonomische Nutzen; er bezieht sich auf das Niveau der »Bedürfnisbefriedigung« oder das Wohlbefinden der Bevölkerung. Die neoklassischen Wirtschaftstheoretiker definieren Nachhaltigkeit gern als Bewahrung (oder Mehrung) des Nutzens über Generationen hinweg. Doch diese Definition ist in der Praxis unbrauchbar. Nutzen ist kein Ding, sondern eine Erfahrung. Er lässt sich mit keinem Maßstab messen und kann auch nicht von einer Generation an die nächste vererbt werden.

Hingegen sind natürliche Ressourcen tatsächlich Dinge. Sie können gemessen und vererbt werden. Insbesondere lässt sich ihr Durchsatz messen – das heißt die Rate ihrer Nutzung, wenn die Wirtschaft sie aus entropiearmen Quellen im Ökosystem entnimmt, in nutzbringende Produkte umwandelt und schließlich als entropiereichen Abfall in die Umwelt zurückkippt (siehe Kasten S. 54). Nachhaltigkeit lässt sich als Durchsatz definieren, wobei die Kapazität der Umwelt ermittelt wird, bestimmte Rohstoffe zu liefern und den am Ende anfallenden Müll zu absorbieren.

Zweierlei Kapital

Es gibt zwei Sorten von Kapital: natürliches und von Menschen produziertes. Die meisten neoklassischen Ökonomen glauben, Kapital von Menschenhand sei ein guter Ersatz für natürliches Kapital; darum plädieren sie dafür, die Summe der beiden beizubehalten – ein Ansatz, der schwache Nachhaltigkeit heißt.

Mit den meisten ökologisch denkenden Wirtschaftswissenschaftlern glaube ich, dass produziertes und natürliches Kapital einander eher ergänzen als ersetzen können; natürliches Kapital sollte für sich allein erhalten bleiben, weil es zum begrenzenden Faktor geworden ist. Dieses Ziel heißt starke Nachhaltigkeit.

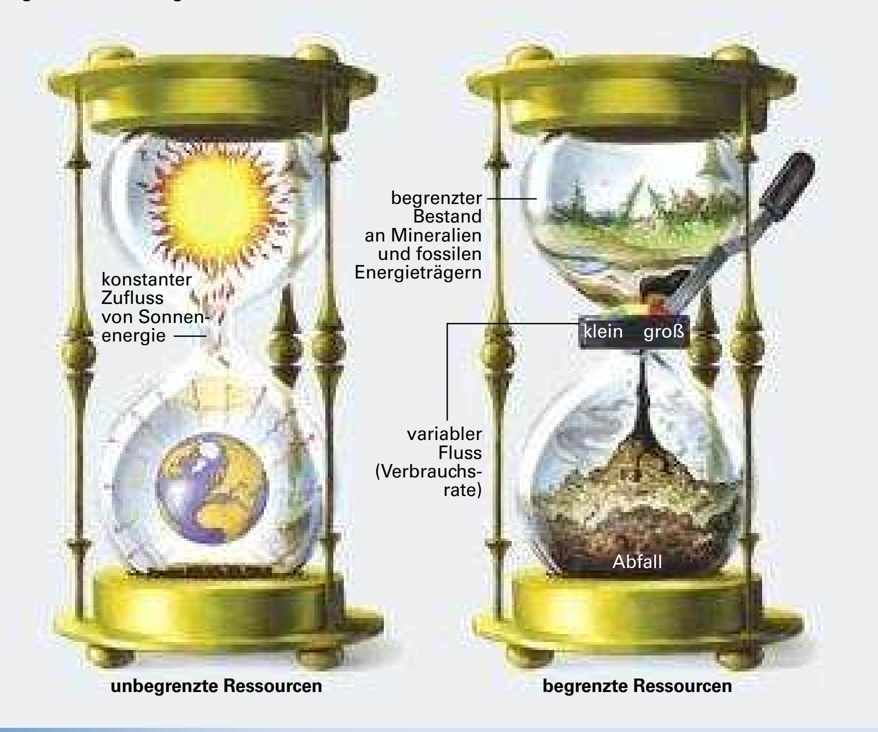
Zum Beispiel wird der jährliche Fischfang gegenwärtig durch das natürliche Kapital der im Meer vorhandenen Fischpopulationen begrenzt und nicht mehr durch das produzierte Kapital in Form von Fangschiffen. Schwache Nachhaltigkeit würde suggerieren, man könne dem Mangel an Fisch durch den Bau zusätzlicher Fangschiffe begegnen. Die starke Nachhaltigkeit erkennt, dass größere Fangflotten nutzlos sind, wenn es zu wenig Fische im Meer gibt; sie besteht darauf, die Fangmengen zu begrenzen, damit die Fischer von morgen ausreichende Bestände vorfinden.

Am besten wird natürliches Kapital durch das so genannte Cap-and-Trade-System geschont: Man definiert für den Gesamtdurchsatz eine Obergrenze *(cap)*, ▷

Wirtschaft als Stundenglas

Der Ressourcenverbrauch der Menschheit lässt sich mit einer Sanduhr veranschaulichen, die nicht umgedreht werden kann. Die Sonne liefert uns praktisch unbegrenzte Energie (links), deren Zufluss wir nicht zu regeln vermögen. Hingegen sind die irdischen Vorräte an fossilen Brennstoffen und Mineralien begrenzt (rechts), doch können wir unsere Verbrauchsrate steigern oder senken. Wenn wir diese Ressourcen schnell verbrauchen, borgen wir uns praktisch Vorräte, die eigentlich künftigen Generationen zustehen, und deponieren noch mehr Abfall in der Umwelt. Dieses Verhalten lässt sich auf Dauer nicht aufrechterhalten.

Manche Ökonomen drücken diesen Mangel an Nachhaltigkeit mit Hilfe physikalischer Gesetze aus. Nach dem Ersten Hauptsatz der Thermodynamik bleibt die Energie eines abgeschlossenen Systems erhalten – sie ist endlich. Nach dem Zweiten Hauptsatz streben Systeme von selbst zu größerer Unordnung, das heißt zu höherer Entropie. Die Menschen überleben und stellen Produkte her, indem sie der Erde nützliche Ressourcen mit niedriger Entropie – fossile Brennstoffe und konzentrierte Mineralien – entziehen und sie in nutzlosen Abfall mit hoher Entropie umwandeln. Während die verfügbare Energiemenge auf Grund des Ersten Hauptsatzes begrenzt ist, nimmt die Abfallmenge auf Grund des Zweiten Hauptsatzes immerfort zu, bis irgendwann der gesamte Brennstoff in nutzlosen Müll verwandelt ist.



MATT COLLINS

▷ die der Kapazität der Umwelt entspricht, Ressourcen zu regenerieren oder Verschmutzung zu absorbieren. Das Recht, »Quellen« anzuzapfen – etwa die Weltmeere – oder »Senken« zu verschmutzen – etwa die Atmosphäre – ist nicht länger gratis, sondern ein knappes Gut, das auf einem freien Markt gehandelt werden kann. Nach dem Cap-and-Trade-Prinzip funktioniert beispielsweise in den USA der Handel mit Schwefeldioxid-Emissionslizenzen, den die Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) zur Einschränkung des sauren Regens eingeführt hat, sowie in Neuseeland die Ausgabe individuell übertragbarer Fischfangquoten, um die Überfischung einzudämmen.

Das Cap-and-Trade-System ist ein Beispiel für die unterschiedliche Rolle von freien Märkten und Regierungspolitik. Die Wirtschaftstheorie hat sich traditionell vor allem mit Allokationsproblemen befasst, das heißt mit der Aufteilung knapper Ressourcen unter konkurrierenden Nutzungsformen. Hingegen vernachlässigt sie die Frage nach der physischen Größe des Wirtschaftssystems relativ zum Ökosystem. Funktionierende Märkte teilen zwar Ressourcen optimal auf, aber sie können die nachhaltige Größenordnung nicht festlegen; das vermag nur politisches Handeln.

Politische Eingriffe

Zum Beispiel geraten die Sozialversicherungssysteme durch den demografischen Übergang in Schwierigkeiten: In einer Bevölkerung, die nicht mehr wächst, gibt es weniger Menschen im erwerbsfähigen Alter und mehr Rentner. Zur Anpassung sind höhere Steuern, ein höheres Rentenalter oder niedrigere Renten nötig.

Produktzyklen: In einer nachhaltigen Wirtschaft müssen auch die Waren gleichsam einen demografischen Übergang durchmachen: Die Produktionsraten sollten den Wertminderungsraten entsprechen. Diese Raten können allerdings auf hohem oder auf niedrigem Niveau gleich sein, wobei niedrigere Raten günstiger sind, weil sie haltbarere Güter und bessere Nachhaltigkeit bedeuten. Langlebige Produkte werden langsamer ersetzt, und entsprechend sinkt das Tempo des Ressourcenverbrauchs.

Dieser Übergang hat eine ökologische Parallele. Junge, wachsende Ökosysteme neigen dazu, die Wachstumseffizienz – gemessen als Produktion pro Einheit bestehender Biomasse – zu maximieren. In ausgereiften Ökosystemen verlagert sich der Schwerpunkt auf die Maximierung der Erhaltungseffizienz; sie gibt an, wie viel vorhandene Biomasse pro Einheit der Neuproduktion erhalten bleibt – das Gegenteil der Produktionseffizienz. Eine ähnliche Umstellung muss unser wirtschaftliches Denken und Handeln vollziehen, um Nachhaltigkeit zu erzielen.

BIP-Wachstum: Dank qualitativer Verbesserungen und höherer Effizienz könnte das BIP selbst bei konstantem Durchsatz wachsen – manche meinen, sogar kräftig. Das würde alle freuen: die Umweltschützer, weil der Durchsatz nicht zunimmt, und die Ökonomen, weil das BIP wächst. Diese Art Wachstum wäre eigentlich die oben definierte qualitative Entwicklung und sollte möglichst weit vorangetrieben werden; doch



auch sie stößt an Grenzen. Wirtschaftssektoren, die als eher »qualitativ« gelten, etwa die Informationstechnologie, haben bei näherer Betrachtung eine breite physische Basis. Außerdem muss die Expansion, wenn sie den Armen nützen soll, Produkte liefern, die sie wirklich brauchen: Kleidung, Unterkunft und Essen auf dem Teller, nicht zehntausend Rezepte im Internet. Sogar die Reichen geben den Großteil ihres Geldes nicht für immaterielle Werte aus, sondern für Autos, Häuser und Reisen.

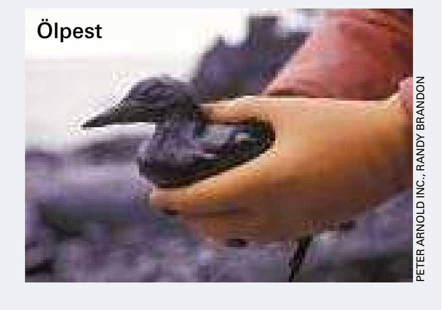
Finanzsektor: Bei nachhaltigem Wirtschaften würden auf Grund fehlenden Wachstums die Zinssätze höchstwahrscheinlich fallen. Der Finanzsektor dürfte schrumpfen, da niedrige Zins- und Wachstumsraten den enormen Überbau von Finanztransaktionen nicht tragen könnten, der derzeit hauptsächlich auf Krediten und Erwartungen künftigen Wirtschaftswachstums beruht. Investitionen würden vorwiegend für den Ersatz und die qualitative Verbesserung von Produkten getätigt statt für die Spekulation auf quantitatives Wachstum.

Faire Bedingungen

Handel: Solange nachhaltige und nicht nachhaltige Wirtschaftssysteme nebeneinander existieren, kann es keinen freien Handel geben, denn Erstere müssen viele Kosten für Umwelt und Zukunft einkalkulieren, die von der Wachstumswirtschaft ignoriert werden. Nicht nachhaltige Wirtschaftssysteme könnten die Preise ihrer nachhaltigen Mitbewerber unterbieten, weil sie die Kosten der Nachhaltigkeit einfach nicht zahlen. Es müsste einen regulierten Handel geben, dessen Regeln diese Unterschiede ausgleichen, sowie einen freien Handel zwischen Nationen, die in gleichem Maß nachhaltig wirtschaften. Solche Handelsschranken gelten als lästig, doch in der Tat wird der Handel auch gegenwärtig stark reguliert – und zwar zum Schaden der Umwelt.

Steuern: Eine Regierung, die eine bessere Nutzung der natürlichen Ressourcen anstrebt, müsste andere Steuern erheben als heute. Sie würde nicht Einkommen aus Arbeit und Unternehmenstätigkeit – den Mehrwert – besteuern, sondern den Durchsatz – den Fluss der Dinge, die mehr wert werden –, und zwar vorzugsweise schon dort, wo die Ressourcen der Biosphäre entnommen werden. Solche Entnahmesteuern für ▷

Wie lässt sich Wohlergehen messen?



PETER ARNOLD INC., RANDY BRANDON



CORBIS, JAMES LEYNSE

Beim Blick in die Wirtschaftsnachrichten könnte man meinen, das Bruttoinlandsprodukt (BIP) sei die Quelle alles Guten. Das BIP misst aber nicht das Wohlergehen, nicht einmal das Einkommen, sondern die gesamte wirtschaftliche Aktivität einer Nation. Es ist definiert als der Marktwert aller pro Jahr im Inland gekauften Endprodukte und Dienstleistungen, zuzüglich aller Ausfuhren nach Abzug der Einfuhren. Zwischenprodukte und Dienstleistungen, die in nachfolgende Produktionsschritte eingehen, werden im BIP nicht mitgezählt.

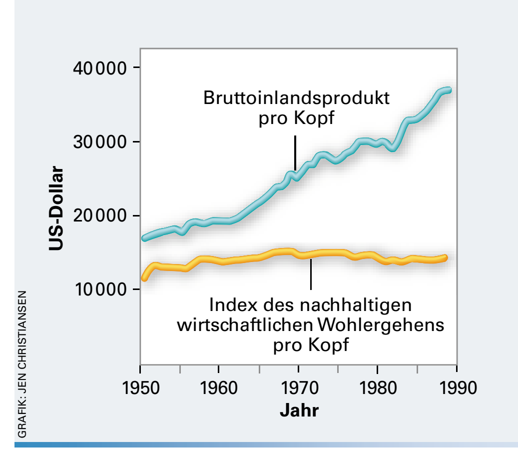
Das BIP berücksichtigt weder den Wertverlust von produziertem Kapital – wie Straßen und Fabriken – noch die Erschöpfung natürlicher Ressourcen – wie Fischbestände oder fossile Brennstoffe – als Minusposten. Hingegen verbucht es so genannte defensive Kosten als Plus. Diese Kosten entstehen, wenn wir uns vor den unerwünschten Folgen des Produzierens und Konsumierens anderer schützen – beispielsweise durch Beseitigen von Umweltschäden.

Da Defensivkosten den Zwischenproduktionskosten gleichen, haben sie im BIP eigentlich nichts zu suchen. Einige Wirtschaftswissenschaftler befürworten jedoch ihre Aufnahme in das BIP, weil sie Wirtschaft und Umwelt verbessern. So gesehen können wir alle reich werden, indem der eine den Schmutz des anderen wegschafft.

Um vom BIP zu einem Maß für nachhaltiges Wohlergehen zu gelangen, sind noch viel mehr positive und negative Korrekturen nötig. Dazu gehört die unbezahlte Hausarbeit des Ehepartners; höhere internationale Verschuldung; Verlust an Wohlergehen durch zunehmende Einkommenskonzentration (ein zusätzlicher Euro bewirkt bei Reichen weniger Wohlbefinden als bei Armen); langfristige Umweltschäden wie Ozonloch oder Verlust von Feuchtgebieten; Wasser- und Luftverschmutzung; Lärmbelastung.

Aus all diesen Korrekturen ergibt sich der von Clifford W. Cobb und John B. Cobb jr. entwickelte Index nachhaltigen wirtschaftlichen Wohlergehens (*Index of Sustainable Economic Welfare*, ISEW). Dieses und ähnliche Maße werden von ökologischen Ökonomen benutzt, in der übrigen Fachwelt aber meist ignoriert.

In Industrieländern wie USA, Deutschland, Großbritannien, Österreich und Schweden scheinen seit den 1980er Jahren die negativen Faktoren im ISEW schneller zu wachsen als die positiven. Mit anderen Worten, dort steigen die Kosten des Wachstums schneller als die Erträge.



GRAFIK: JEN CHRISTIANSEN

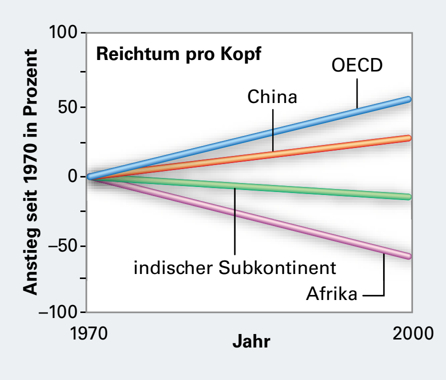
Während in den USA das Bruttoinlandsprodukt kräftig zugenommen hat, stagniert das nachhaltige Wohlergehen.

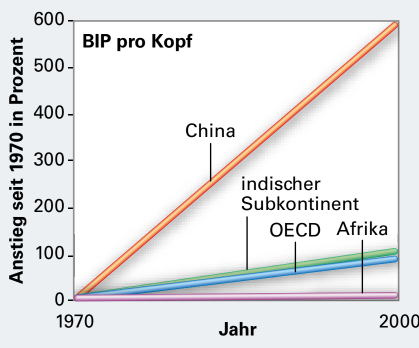
Das rechte Maß für Reichtum

Von Partha Dasgupta

Die meisten Ökonomen sind Optimisten. Sie stellen fest, dass die Wirtschaftsleistung der westlichen Welt seit der industriellen Revolution deutlich zugenommen hat. Sie nennen als Ursache die Akkumulation des produzierten Kapitals – Straßen, Maschinen, Anlagen, Gebäude – sowie verbesserte Kenntnisse, Fähigkeiten und Institutionen, beispielsweise ein verlässliches Rechtssystem. Sie behaupten, man müsse nur durch Bildung, Forschung und Entwicklung für mehr Wissen und Können sorgen; dadurch werde die Produktivität weiter steigen, und die Weltwirtschaft werde noch sehr lange wachsende Gütermengen ausstoßen.

Doch manche Wirtschaftsforscher kritisieren diesen Optimismus. Sie betonen, dass die Erde ein endliches System ist und dass wir die Dienste der Natur bereits in einem für die Biosphäre langfristig untragbaren Ausmaß beanspruchen. Sie fordern Sofortmaßnahmen, um das Wachstum der Naturausbeutung zu stoppen. Forscher wie Herman E. Daly und andere in diesem Artikel Genannte ziehen zu Recht den gängigen Optimismus in Zweifel, weil er die Grenzen der Natur missachtet – aber auch sie selbst können in mehreren Punkten kritisiert werden. Insbesondere sagen sie nicht, wie man zu praktisch-politischen Schlussfolgerungen gelangt, und sie liefern keine sinnvolle Methode, um Kosten und Nutzen für die Menschen zu beurteilen, falls das Wachstum der Ressourcennutzung völlig gestoppt würde.





Einige Ökonomen – mich eingeschlossen – suchen beide Schwächen zu vermeiden, indem sie den Begriff der nachhaltigen Entwicklung verfeinern. Der berühmte Brundtland-Bericht der Vereinten Nationen von 1987 definiert eine Entwicklung als »nachhaltig«, wenn sie den gegenwärtigen Bedürfnissen entspricht, ohne dass darunter die Fähigkeit künftiger Generationen leidet, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen. Zu diesem Zweck soll jede Generation der nächsten zumindest so viel Reichtum pro Kopf hinterlassen, wie sie selbst geerbt hat. Reichtum ist definiert als der Wert der volkswirtschaftlichen Produktionsgrundlage; sie umfasst von Menschenhand geschaffenes Kapital, natürliches Kapital, Wissen, Können und Institutionen. Wirtschaftliche Entwicklung soll als Wachstum des Reichtums pro Kopf betrachtet werden, nicht als wachsendes Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf.

Zwischen BIP und gesellschaftlichem Reichtum besteht ein großer Unterschied. Das BIP erfasst Faktoren wie den Kauf von Gütern und Dienstleistungen, aber nicht die Wertminderung von Kapitalguthaben, zum Beispiel die Schädigung von Ökosystemen. Darum kann das BIP pro Kopf wachsen, während der Reichtum pro Kopf sinkt. Das BIP ist mitunter ein gänzlich irreführender Index menschlichen Wohlergehens.

Wie entwickeln sich Nationen, wenn sie am Kriterium der Nachhaltigkeit gemessen werden? Die von der Weltbank kürzlich veröffentlichten Zahlen über den Verbrauch einiger natürlicher Ressourcen – Erdöl, Erdgas, Mineralien, die Atmosphäre als Kohlendioxidsenke und Wälder als Holzquelle – belegen, dass in Schwarzafrika sowohl das BIP als auch der Reichtum pro Kopf in den letzten drei Jahrzehnten gesunken ist (siehe Grafiken). Hingegen hat auf dem indischen Subkontinent zwar das BIP pro Kopf zugenommen, aber der Reichtum pro Kopf ist gesunken. Dieser Verlust trat ein, weil relativ zum Bevölkerungswachstum die Investitionen in produziertes Kapital sowie verbesserte Institutionen die Entwertung des natürlichen Kapitals nicht auszugleichen vermochten. Zudem haben Länder mit höherem Bevölkerungswachstum auch schneller Pro-Kopf-Reichtum eingebüßt.

Besser ergeht es China und den meisten Ländern der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD): Sowohl BIP als auch Reichtum pro Kopf sind gewachsen. Der Verlust an natürlichem Kapital wurde durch Akkumulation anderer Vermögenswerte und verbesserte Institutionen mehr als wettgemacht. Auf den ersten Blick hat sich der reiche Teil der Welt während der letzten drei Jahrzehnte nachhaltig entwickelt, während die Entwicklung des armen Teils der Welt – außer China – nicht nachhaltig verlaufen ist.

Doch bei näherer Betrachtung erweisen sich diese Schätzungen der Reichtumsentwicklung als allzu optimistisch. In den Zahlen der Weltbank fehlen viele Formen natürlichen Kapitals und somit auch deren Wertminderung: Süßwasser, Boden, Meeresfische, ökologisch wertvolle Wälder und Feuchtgebiete sowie die Atmosphäre als Senke für Staub, Stick- und Schwefeloxide. Außerdem wird in den Schätzpreisen, mit denen die Weltbank die in ihrer Liste aufgeführten natürlichen Guthaben bewertet, die begrenzte Regenerationsfähigkeit natürlicher Systeme ignoriert. Wenn all das berücksichtigt wird, stellt sich womöglich heraus, dass selbst bei China und den wohlhabenden Nationen von echtem Wachstum des Reichtums keine Rede sein kann.

Kurz, in der heutigen Wirtschaftsforschung herrscht grundloser Optimismus. Die Menschheit muss erst Institutionen und gezielte Maßnahmen für nachhaltiges Wirtschaften entwickeln. Für diesen Zweck haben die Ökonomen nun wenigstens einen begrifflichen Rahmen, um den tatsächlichen Reichtum einer Volkswirtschaft abzuschätzen. Damit können sie konkrete Maßnahmen vorschlagen, statt bloß sofortiges Nullwachstum zu fordern.

Sir Partha Dasgupta ist Professor für Wirtschaftswissenschaften an der Universität Cambridge.



GETTY IMAGES / TIME LIFE PICTURES, CHARLES FENNOJACOBS

Staatlich festgesetzte Obergrenzen und handelbare Emissionsrechte limitieren den Gesamtausstoß von Schwefeldioxid. Solche Maßnahmen tragen zur Nachhaltigkeit bei.

▷ Erdöl oder Holz sind in mehreren US-Bundesstaaten üblich. Sie führen zu sparsamerer Ressourcennutzung und sind relativ leicht einzutreiben. Es ist vernünftig, das zu besteuern, von dem wir weniger haben möchten – Ressourcenschwund und Umweltverschmutzung –, und nicht das, von dem wir gern mehr hätten, nämlich Einkommen.

Beschäftigung: Lässt Nachhaltigkeit Vollbeschäftigung zu? Eine knifflige Frage, und die Antwort lautet: wahrscheinlich nicht. Fairerweise darf man aber auch fragen, ob Vollbeschäftigung in einer Wachstumswirtschaft erreichbar ist, die durch Betriebsauslagerungen, Import billiger Arbeitskräfte und Forcierung arbeitssparender Technologien angetrieben wird. In einer nachhaltigen Wirtschaft werden Wartung und Reparatur wichtiger. Da diese Dienstleistungen arbeitsintensiver sind als Neuproduktion und zudem relativ sicher vor Verlagerung ins Ausland, können sie zusätzliche Arbeitsplätze schaffen.

Zufriedenheit: Eine Triebkraft für nicht nachhaltiges Wachstum ist das Axiom der Unersättlichkeit: Je mehr die Menschen konsumieren, desto glücklicher werden sie. Doch die Forschung experimenteller Ökonomen und Psychologen widerspricht diesem Axiom (siehe »Die Qual der Wahl« von Barry Schwartz, Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 70). Wie Richard A. Easterlin, der jetzt an der University of Southern California tätig ist, Mitte der 1990er Jahre zeigte, bedeutet Wachstum keineswegs immer mehr Wohlbefinden. Der Zusammenhang zwischen absolutem Einkommen und Zufriedenheit gilt nur bis zu einem bestimmten Schwellenwert; jenseits dieses Sättigungspunkts entscheidet nur die relative Stellung, für wie glücklich man sich hält.

Wachstum vermag nicht das relative Einkommen aller anzuheben. Den Personen, deren relatives Einkommen infolge zusätzlichen Wachstums steigt, stehen immer andere mit sinkendem Relativeinkommen gegenüber. Nähme das Einkommen aller proportional zu, dann wüchse das relative Einkommen für keinen, und niemand fühlte sich glücklicher. Wachstum gleicht dann einem Wettrüsten, bei dem keine Seite gewinnt.

Die reichen Länder haben wahrscheinlich die »Nutzlosigkeitsschwelle« erreicht, von der an weiteres Wachstum die Zufriedenheit nicht erhöht. Das bedeutet nicht, dass die Konsumgesellschaft am Ende ist, sondern einfach nur, dass das Hochtreiben des Konsums über den Sättigungspunkt hinaus – ob durch aggressive Werbung oder schiere Besitzgier – die Menschen nach eigener Einschätzung nicht glücklicher macht.

Politisch machbar

Das Gute daran ist, dass Gesellschaften, die diese Sättigung erreicht haben, durch Nachhaltigkeit nur geringe Verluste an Zufriedenheit erleiden. Ein nachhaltiges Wirtschaftssystem ist vielleicht weniger »politisch unmöglich« als oft behauptet.

Wenn wir die erforderlichen Anpassungen nicht vornehmen, wird die Welt immer unwohnlicher und ärmer an Fischen, fossilen Brennstoffen und anderen natürlichen Ressourcen werden. Durch falsche Bilanzierung auf BIP-Basis, die den Ressourcenverbrauch als Einkommen verbucht, lassen sich diese Verluste noch eine Weile kaschieren. Doch letztlich wird sich das Desaster bemerkbar machen. Es abzuwenden wird schwierig sein. Je früher wir beginnen, desto besser. ◁



AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Herman E. Daly ist Professor an der School of Public Policy der University of Maryland. Von 1988 bis 1994 war er als leitender Ökonom in der Umweltabteilung der Weltbank tätig. Dort wirkte er an der Formulierung von Richtlinien für nachhaltige Entwicklung mit. Daly ist Mitbegründer und Mitherausgeber der Zeitschrift »Ecological Economics« sowie Autor mehrerer Bücher.

Ecological economics: principles and applications. Von Herman E. Daly und Joshua Farley. Island Press, 2004

Human well-being and the natural environment. Von Partha Dasgupta. Oxford University Press, 2001

Will raising the incomes of all increase the happiness of all? Von Richard Easterlin in: Journal of Economic Behavior and Organization, Bd. 27, S. 35, 1995

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Globalisierung der Krankheit

Die Armen leiden unter den Krankheiten der Reichen – und umgekehrt. Auch in ihren medizinischen Problemen wächst die Welt zusammen. Das zwingt das öffentliche Gesundheitswesen aller Länder zu einer Umorientierung.





MAGNUM PHOTOS, STUART FRANKLIN

Entwicklungsländer wie Malaysia haben mit schweren Gesundheitsproblemen zu kämpfen – neuerdings auch mit Übergewicht und dessen Folgen.

Von Barry R. Bloom

Stephen Lewis, Sondergesandter der Vereinten Nationen für HIV/Aids in Afrika, besuchte auf einer Reise durch Simbabwe eine Grundschule und fragte die Kinder, was ihnen die größten Sorgen mache. Sieben von zehn Kindern gaben die erschreckend einfache Antwort: »Der Tod.«

Im weiteren Verlauf seiner Reise, in Sambia, kam Lewis in ein Dorf mit Kohlfeldern und fragte die Dorfbewohner, ob sie genug zu essen hätten. »Ja«, antworteten sie, »wir können sogar einiges verkaufen.« – »Und wofür verwendet ihr den Erlös?« – »Wir kaufen Särge.«

Die Geschichte ist wahr und noch nicht lange her, sie bestätigt das Klischee, dass in den Entwicklungsländern der Tod herrsche – aber sie ist inzwischen untypisch. Die Dritte Welt, in der 83 Prozent der Erdbevölkerung leben, ist überaus vielfältig. Auf allen Kontinenten findet ein bemerkenswerter demografischer Wandel statt: Die Landbevölkerung zieht in die Städte, die Frauen bekommen weniger Kinder, und das Durchschnittsalter der Bevölkerung steigt. Staaten mit rasch wachsender Wirtschaftskraft wie Indien und China haben inzwischen mit ähnlichen Gesundheitsproblemen zu kämpfen wie die reichen Industrieländer (Bild links).

Vielen Entwicklungsländern ist es gelungen, die Infektionskrankheiten zurückzudrängen und die Gesundheitsverhältnisse zu verbessern, etwa durch Impfprogramme, sauberes Wasser, medizinische Grundversorgung und bessere Ernährung. Entsprechend werden die Menschen älter und sterben nicht mehr vorrangig an Infektionen, sondern an chronischen Erkrankungen des höheren Lebensalters wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Diabetes und Krebs. Im Weltmaßstab machen mittlerweile die chronischen Krankheiten die Mehrheit aller Erkrankungen überhaupt aus.

Dabei sind die Infektionskrankheiten nach wie vor eine große Bedrohung, ▷

▷ nicht nur in Afrika, sondern auch in allen Ländern einschließlich der USA, wo die bakteriellen Krankheitserreger immer umfassendere Resistenzen gegen Antibiotika entwickeln und die etwa 45 Millionen Menschen, die keine Krankenversicherung haben, durch eigentlich gut behandelbare Krankheiten gefährdet sind. Darüber hinaus überschreiten neuartige Erreger im Zeitalter der Globalisierung mühelos nationale Grenzen und verbreiten sich mit der Geschwindigkeit von Düsenflugzeugen. Einerlei, wo ein solcher Erreger auftritt, er stellt für die gesamte Menschheit eine reale Gefahr dar, die keine Nation im Alleingang bewältigen kann.

Infolgedessen findet eine gänzlich unerwartete Angleichung statt. Zumindest aus medizinischem Blickwinkel ist die Welt nicht mehr geteilt in Entwicklungsländer, die von Infektionskrankheiten heimgesucht werden, und Industrienationen, die davon weit gehend verschont bleiben. Mit der Ausnahme von Schwarzafrika gibt es zwischen der Nord- und der Südhalbkugel mehr Ähnlichkeiten als Unterschiede.

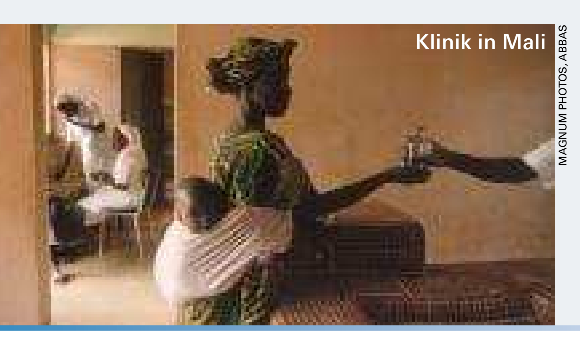
Vielmehr verlaufen die Grenzlinien heute innerhalb der Länder und Regionen, und zwar vor allem zwischen Arm und Reich. In den ärmsten Ländern stirbt jedes zweite Kind, bevor es fünf Jahre alt wird. Auch in manchen Gegenden der USA sind die Diskrepanzen erschreckend. Indianer in South Dakota haben eine um 13 Jahre geringere Lebenserwartung als Weiße in Teilen von Minnesota. Während etwa 88 Prozent der männlichen weißen Bevölkerung ihren 65. Geburtstag erleben, sind es unter den schwarzen Männern nur 76 Prozent.

Solche Ungleichheiten sind angesichts der heutigen medizinischen Möglichkeiten nicht nur ethisch unvertretbar, sondern auch ökonomisch schädlich. Ein schlechter allgemeiner Gesundheitszustand hemmt die Produktivität, während die Überschüsse, die eine gesunde Bevölkerung erwirtschaftet, Armut und soziale Ungerechtigkeit mildern können. Obendrein kann ein mangelhaftes Gesundheitssystem in einem Land erhebliche Folgekosten für die Nachbarländer verursachen, wie der Ausbruch von Sars in Asien 2003 gezeigt hat.

Öffentliche Gesundheit am Scheideweg

Das Problem

- Die gesundheitlichen Unterschiede zwischen Arm und Reich nehmen zu.
- Die Zukunft der öffentlichen Gesundheit ist äußerst unsicher. Während Infektionskrankheiten weltweit auf dem Rückzug sind, nehmen chronische Erkrankungen an Bedeutung zu. Viele von ihnen sind auf ungesunde Lebensweise zurückzuführen und werden ohne das entschiedene Handeln von Regierungen und Gesundheitsorganisationen nicht zurückgehen.
- Eine tödliche Pandemie, ein bioterroristischer Angriff oder eine Umweltkatastrophe könnten schwere Krisen auslösen.



Klinik in Mali

MAGNUM PHOTOS, ABBAS

Der Plan:

- Der Königsweg zu einer gesunden Zukunft ist die Prävention. Bereits einfache Maßnahmen erweisen sich zur Vorbeugung gegen viele Infektionen und chronische Erkrankungen als sehr wirkungsvoll.
- Mit gutem Datenmaterial und geeigneten Analysemethoden lassen sich die Prioritäten so setzen, dass sich der größte Nutzen für die größte Zahl an Menschen ergibt.
- Mit koordinierten Aktionsplänen und multilateraler Kooperation können regionale Lücken in der Gesundheitsversorgung geschlossen und die Verunreinigung von Luft und Wasser vermindert werden.
- Durch den Aufbau einer globalen Koordinationsstruktur, die rasch und effektiv auf neue Bedrohungen reagiert, lassen sich die katastrophalen Folgen von Seuchen und Naturkatastrophen weit gehend eindämmen.

Zwischen unserem Wissen über den neuen Stand des öffentlichen Gesundheitswesens und den Taten, die daraus eigentlich folgten müssten, klafft eine beschämend große Lücke. Die Probleme jedes einzelnen Landes sind nicht mehr im nationalen Maßstab zu lösen, sondern erfordern internationale Kooperationen und globale Strukturen, die bislang nicht existieren.

Milliarden gesunde Lebensjahre verloren

Bis vor nicht allzu langer Zeit arbeitete die Weltgesundheitsorganisation (WHO) mit einer einzigen Maßzahl für Gesundheit: der Sterblichkeit. Ein Mensch lebte oder war tot. Chronische Krankheiten, Verletzungsfolgen und die häufig daraus folgende Arbeitsunfähigkeit wurden von der Statistik nicht erfasst.

Mittlerweile gelingt es der WHO jedoch mittels verbesserter Analysemethoden, nicht nur die Verbreitung chronischer Erkrankungen zu erfassen, sondern auch ihre Auswirkungen auf die Gesellschaft zu messen. Mit den inzwischen gesammelten Daten, so genannten Lebensqualitäts-Indikatoren, können die Epidemiologen Entwicklungen vorhersagen, Ansteckungsquellen eingrenzen, Erkrankungsmuster erkennen und in sinnvoller Weise die sozialen und ökonomischen Belastungen durch chronische Erkrankungen einerseits und Infektionskrankheiten andererseits quantifizieren. Diese Zahlen dienen vielen Ländern dazu, Prioritäten in ihrer Gesundheitspolitik zu setzen.

Eine der wertvollsten statistischen Größen trägt den Namen Dalys, das heißt *disability adjusted life years* oder krankheitskorrigierte Lebensjahre. Man notiert nicht einfach, ob ein Mensch stirbt, sondern zählt die Lebensjahre, die er dadurch verliert, dass er vor der Zeit stirbt oder ein Schicksal wie Verstümmelung oder Siechtum erleidet, das kaum besser ist als der Tod. Die Angaben können nach Erkrankung, geografischer Region, Alter, Geschlecht und anderen Einflussgrößen aufgeschlüsselt werden. Mit Hilfe der Daly-Zahlen sind die Auswirkungen verschiedener Krankheiten genau bezifferbar, was völlig neue Möglichkeiten der Gesundheitsvorsorge eröffnet.

Im Jahr 1999, dem ersten, für das Daly-Daten erhoben wurden, starben weltweit etwa 56 Millionen Menschen. Im gleichen Zeitraum gingen 1,4 Milli-



Veränderte Erkrankungsmuster

AP PHOTO, CHINATOPIX

Die wesentlichen Ursachen für den Verlust gesunder Lebensjahre, gemessen in Dalys (krankheitskorrigierten Lebensjahren), verschieben sich von akuten Infektionen hin zu chronischen Erkrankungen, die auf das Alter und ungesunde Lebensgewohnheiten zurückzuführen sind. Bis 2020 werden Herzkrankheiten, Depressionen und Verkehrsunfälle die Liste anführen. Der abgebildete Unfall ereignete sich Anfang des Jahres in Hangzhou (China).

Hauptursachen für den Verlust gesunder Lebenszeit

Rang	1990*	2020 (Prognose)
1	Lungenentzündungen und andere Atemwegsinfektionen	Herzkrankheiten
2	Durchfallerkrankungen	Depressionen
3	Kindbett- und Säuglingssterblichkeit	Verkehrsunfälle
4	Depressionen	Schlaganfälle
5	Herzerkrankungen	chronisch-obstruktive Lungenerkrankungen
6	Schlaganfälle	Lungenentzündungen und andere Atemwegsinfektionen
7	Tuberkulose	Tuberkulose
8	Masern	Kriege
9	Verkehrsunfälle	Durchfallerkrankungen
10	angeborene Fehlbildungen	Aids

*Auf Basis von Daten des Jahres 1990, die nachträglich mit der Daly-Methodik ausgewertet wurden.
Quelle: Centers for Disease Control and Prevention (CDC) und Harvard School of Public Health

arden gesunde Lebensjahre durch nicht tödliche, aber dauerhaft beeinträchtigende Krankheiten verloren – weitaus mehr, als die Forscher erwartet hatten. Auf Schwarzafrika, wo nur zehn Prozent der Weltbevölkerung leben, entfallen 26 Prozent der weltweit vernichteten gesunden Lebensjahre. Die wesentliche Ursache sind Infektionskrankheiten und unter diesen vorrangig Aids.

Mit Hilfe von Dalys lässt sich auch der gesellschaftliche Schaden ungesunder Lebensweise in Zahlen ausdrücken. In den USA ist etwa die Hälfte der jährlichen Todesfälle auf Zigarettenrauchen, Alkohol, Fehlernährung und Bewegungsmangel zurückzuführen. Durch die Folgen des Tabakkonsums verlieren weltweit jährlich etwa fünf Millionen Menschen das Leben und weitere Millionen etliche gesunde Jahre durch Herz-, Kreislauf- oder Lungenkrankheiten. Die Fettsucht, die epidemische Ausmaße erreicht hat, trägt maßgeblich zur Entstehung von koronaren Herzkrankheiten, Diabetes mellitus, Depressionen und weiteren schweren Erkrankungen bei.

Besonders in den Schwellenländern nimmt die Zahl tödlicher Arbeitsunfälle und berufsbedingter Gesundheitsschäden explosionsartig zu, da bei hohem Leistungsdruck und langen Arbeitszeiten die Sicherheit der Arbeiter auf der Strecke bleibt. Exakte Zahlen sind kaum verfügbar, die Internationale Arbeitsorganisation (ILO) der WHO schätzt jedoch, dass tödliche Arbeitsunfälle in China etwa fünfmal so häufig vorkommen wie in den USA und die Zahl der Verletzungen am Arbeitsplatz im Vergleich noch erheblich höher liegt.

Wenn die aktuellen Trends anhalten und wir von einer unerwarteten schweren Seuche verschont bleiben, wird bis 2020 die Häufigkeit von Infektionskrankheiten, insbesondere Cholera und Tuberkulose, im Vergleich zu derjenigen chronischer Erkrankungen weltweit abnehmen. Psychische Erkrankungen, vor allem depressive Störungen (die relativ wenige Todesfälle, aber erhebliche Beeinträchtigungen des Lebens verursachen) werden vermehrt auftreten und Platz 2 auf der Rangliste der weltweit größ- ▷



AP PHOTO, MARCO UGARTE

Viele mexikanische Pflegeschülerinnen arbeiten nach ihrer Ausbildung in den USA. Die Abwanderung von Ärzten und Pflegekräften in reichere Länder gefährdet die Stabilität der Gesundheitssysteme in den Entwicklungsländern.

ten Lebenszeitvernichter einnehmen. Auf Platz 1 werden Herzkrankheiten stehen und auf Platz 3 überraschenderweise Verkehrsunfälle. Hierzu tragen vor allem die Entwicklungsländer bei, in denen Vorschriften für die Fahrerlaubnis und die Zulassung und Sicherheitsüberprüfung von Fahrzeugen nicht existieren oder nicht hinreichend durchgesetzt werden. Gleichzeitig werden Adipositas, tabakbedingte Erkrankungen und Arbeitsunfälle weiter an Häufigkeit zunehmen und die in anderen Bereichen erzielten Fortschritte zunichte machen.

Das wichtigste Mittel im Kampf gegen Krankheiten aller Art ist die Vorbeugung. Sie vermindert die Krankheitsfolgen und die Sterblichkeit wesentlich wirksamer als die Behandlung bereits ausgebrochener Krankheiten; und einfache Interventionen können erstaunlich große Wirkungen entfalten.

Dies zeigte sich am Beispiel der Tsunami-Katastrophe des letzten Jahres. Unmittelbar nach dem Ereignis konzentrierten sich alle Kräfte auf Sofortmaßnahmen, aber der Ausbruch von Seuchen drohte, und die Zeit war knapp. Experten fürchteten, dass an Infektionen infolge der Katastrophe mehr Menschen sterben würden als an der Flutwelle selbst. Mittels realistischer Vorgaben und internationaler Koordination gelang es, rasch das Notwendigste herbeizuschaffen: sauberes Trinkwasser, Impfstoffe und Moskitonetze. Bereits diese Basisversorgung verhinderte die epidemische Ausbreitung von Cholera, Masern, Durchfallerkrankungen und Malaria.

Gelingen solche Interventionen, wie es in den Wochen nach dem Tsunami der Fall war, gibt es paradoxerweise keine spektakulären Ergebnisse vorzuweisen. In der öffentlichen Gesundheitsvorsorge besteht der Erfolg darin, dass nichts passiert.

Allgemein ist es in den letzten Jahren gelungen, Millionen von Menschen mit Impfstoffen, Antibiotika, Nahrungsmitteln und verbesserter Hygiene zu versorgen und dadurch die Rate tödlich verlaufender Infektionen um bis zu 60 Prozent zu senken. Große Impfprogramme der WHO sollen vor allem in Afrika alle Kinder gegen die wichtigsten Infektionskrankheiten schützen, ein Ziel, das die Vereinten Nationen in ihrem »Millennium Development Project« formuliert haben. Länder wie Indien und China haben landesweite Impftage ins Leben gerufen – mit außerordentlichem Erfolg: Im November 2004 impften 2,5 Millionen freiwillige Helfer innerhalb nur einer Woche 167 Millionen indische Kinder gegen Kinderlähmung.

Basisversorgung verhindert Epidemien

Über den gesundheitlichen Nutzen hinaus sind Impfungen auch ökonomisch sinnvoll. Für jeden Dollar, der in den USA für den Kombi-Impfstoff gegen Diphtherie, Keuchhusten und Typhus (DPT) ausgegeben wird, spart das Land 29 Dollar Behandlungskosten ein. Bei der Impfung gegen Masern, Mumps und Röteln (MMR) rentiert sich ein ausgegebener Dollar mit 21 Dollar späterer Ersparnis – ohne Zweifel eine lohnende Investition.

Präventionsprogramme gegen die Infektion mit dem Aids-Virus HIV haben sich in den USA und Deutschland ebenso wie in Uganda, Thailand und Brasilien als hochwirksam erwiesen. Die Beispiele zeigen, dass die Ausbreitung dieser Krankheit mit landesweit koordinierten Anstrengungen eingedämmt werden kann. Antiretrovirale Medikamente, die in steigender Zahl auf den Markt kommen und von den Pharmaunternehmen teils zu Gestehungskosten angeboten werden, können das Leben infizierter Menschen verlängern. Damit gilt auch die Diagnose »HIV« nicht mehr als hoffnungslos, und die Bereitschaft, sich testen zu lassen, wird zunehmen. Die Verbindung von Therapie und Infektionsverhütung dürfte in den nächsten Jahren eine gnadenlos tödlich verlaufende Krankheit zu einer mehr oder weniger gewöhnlichen chronischen Erkrankung machen. Dazu sind jedoch koordinierte Aufklärungs- und Motivationsmaßnahmen erforderlich. Die Zeit drängt, denn das Immunschwächevirus breitet sich nicht nur in Afrika, sondern auch in Indien, Südasien und Osteuropa weiter mit enormer Geschwindigkeit aus.

Auch in der Prävention von Alterskrankheiten gibt es einige große Erfolge vorzuweisen. Mit Medikamenten gegen Bluthochdruck und Programmen zu Ernährungsumstellung und körperlicher Bewegung gelang es in den vergangenen 20 Jahren in den USA, die Sterberate an Herzinfarkten und Schlaganfällen um 50 beziehungsweise 30 Prozent zu senken. Da der Patentschutz für viele Medikamente zur Therapie von Herz-Kreislauf-Erkrankungen (Acetylsalicylsäure, einige Beta-Blocker, Statine und ACE-Hemmer) inzwischen abgelaufen ist, sind sie heute vergleichsweise preiswert erhältlich. Daher sind im Prinzip ähnliche Erfolge auch in vielen ärmeren Ländern erzielbar.

Einige Hoffnungen setzt man in diesem Zusammenhang in das Humangenomprojekt. In dem Maß, wie es gelingt, die Zusammenhänge zwischen dem Erbgut einerseits und der Disposition für gewisse Erkrankungen, der Reaktion auf Umwelteinflüsse und der Wirksamkeit von Medikamenten andererseits zu klären, müssten auch völlig neue, auf den individuellen Patienten abgestimmte Therapien zu finden sein, die insbesondere Patienten mit chronischen Erkrankungen ein besseres Leben ermöglichen.

Ein besonders heikles Gebiet der Prävention ist der Tabakkonsum. Rauchen ist nicht Ausdruck individueller Freiheit, sondern eine Sucht. Sozialer Druck und Werbung verführen zum Griff nach der ersten Zigarette, und ab diesem Moment dominiert die Physiologie, denn Nikotin ist eine der am stärksten suchterzeugenden Substanzen. Hier sind in erster Linie die Regierungen gefordert, durch Medienkampagnen gegen das Rauchen sowie ein Verbot der Tabakwerbung und des Rauchens in öffentlichen Einrichtungen vor allem junge Menschen vom Nikotinkonsum abzuhalten.

Für Kinder gibt es zwei gegenläufige Maßnahmen, die sehr segensreich wir-

ken: Man gebe den Unterernährten ausreichend Kalorien, Vitamine und Nährstoffe, und man begrenze die Gewichtszunahme der Überernährten.

Schließlich ist auch für die Abwehr neuartiger Infektionskrankheiten Prävention erforderlich. Es gilt Seuchen einzudämmen, bevor sich eine größere Zahl von Menschen infiziert. Bei hochansteckenden Erregern, die sich rasch verbreiten, sind Quarantänemaßnahmen häufig unwirksam. Daher brauchen wir globale und nationale Überwachungsstrukturen, die auf neue Bedrohungen rasch reagieren und sowohl natürlich auftretende Erreger als auch bioterroristische Angriffe frühzeitig erkennen. Dazu gehören leistungsfähige Labors, die unbekannte Krankheitserreger identifizieren können, und Gesundheitsbehörden, die zur Kommunikation und Kooperation auf internationaler Ebene fähig sind. Bis jetzt haben wir Glück gehabt: Neuartige Erreger wie das Sarsvirus in Asien und das Ebolavirus in Afrika verursachten nur begrenzte Ausbrüche. Dennoch müssen wir wachsam bleiben, denn es ist nur eine Frage der Zeit, bis wieder ein Erreger auftaucht, der große Teile der Weltbevölkerung bedroht.

Planlos in die Flutkatastrophe

Das ist eine lange Liste von Aufgaben. Dabei die richtigen Prioritäten zu setzen, wäre selbst dann nicht einfach, wenn man im Prinzip zu ihrer Erfüllung in der Lage wäre. Nur sind dafür die inter- ▷

Gefahr droht überall

Neuartige Infektionskrankheiten, gegen die der Mensch kaum Abwehrkräfte hat, sind unkalkulierbare Risiken für die öffentliche Gesundheit. In der Tabelle sind sie nach dem Zeitpunkt geordnet, zu dem der jeweilige Erreger erstmals oder wieder in bedeutendem Umfang auftrat (durch Stern gekennzeichnet). Außer HIV hat bisher keiner dieser Erreger eine globale Katastrophe ausgelöst, doch ist dies wohl nur auf glückliche Umstände zurückzuführen. Infektiologen befürchten vor allem einen großen Ausbruch der Vogelgrippe. Es sei nur eine Frage der Zeit, bis ein mutierter Virusstamm auftritt, der effektiv von Mensch zu Mensch übertragen wird und einen globalen Seuchenzug auslöst. Um eine solche Pandemie zu verhindern, wurden im vergangenen Jahr auf einem Bauernhof in Vietnam viele tausend Hühner getötet, von denen einige Grippesymptome gezeigt hatten (Bild).

Neu aufgetretene Infektionskrankheiten

1973	Rotavirus-Infektion
1977	Ebola
1977	Legionärskrankheit
1981	Toxisches Schocksyndrom
1982	Lyme-Borreliose
1983	HIV/Aids
1991	Mehrfachresistente Tuberkulose
1993	Cholera (Stamm O139)
1994	Cryptosporidium-Infektion (großer Ausbruch in Wisconsin)
1998	Vogelgrippe
1999	Westnil-Fieber* (erstes Auftreten in den USA)
2003	Sars (schweres akutes Atemnotsyndrom)
2004	Marburgvirus-Infektion* (größter Ausbruch: Angola)



GETTY IMAGES / AFP, HOANG DINH NAM

▷ nationalen Strukturen der Gesundheitsvorsorge in vielerlei Hinsicht völlig unzureichend. Das hat die Flutkatastrophe in Südasien in drastischer Weise gezeigt. Regierungen und internationale Organisationen waren auf der Stelle zur Hilfe bereit, aber es gab keine zentrale Koordinationsstelle, an die sie sich hätten wenden können. Es existierte keine internationale Organisation, die einer Katastrophe dieses Ausmaßes gewachsen gewesen wäre, keine übergeordnete Leitstelle, keine Liste der zuständigen Personen und Institutionen. Trotz aller Fortschritte der letzten Jahre in der öffentlichen Gesundheitsvorsorge gab es für die gebotene Rettungsaktion, die mehr als fünf Länder umfasste und eine Fülle von medizinischen und ökologischen Problemen sowie den kompletten Zusammenbruch der Infrastruktur zu bewältigen hatte, keinen zentralen Plan.

Auch für weniger akute grenzüberschreitende Gefährdungen existiert bisher keine globale Administration. Auf nationaler Ebene sind die Gesundheitsprobleme eines Landes nicht zu lösen. Vielleicht wehen die ungereinigten Abgase der chinesischen Kohlekraftwerke bis über den Pazifik und machen den

Acht entscheidende Schritte zu einer gesünderen Welt

Keine dieser Strategien ist überall auf der Welt anwendbar; aber die Umsetzung der folgenden Empfehlungen würde sich zweifellos günstig auf die allgemeine Weltgesundheit auswirken.

1. Verkauf von Tabakwaren und Werbung dafür beschränken; die Nikotinsucht bekämpfen.
Dies ist die bei weitem effektivste Einzelmaßnahme zur Prävention schwerer Krankheiten in reichen wie armen Ländern. Vor Kurzem unterzeichneten die Vertreter von 192 Ländern, darunter auch die USA und Deutschland, die Rahmenkonvention zur Beschränkung des Tabakkonsums (*Framework Convention on Tobacco Control*, FCTC). In diesem von der WHO vorangetriebenen Vertragswerk setzen sich die Unterzeichnerländer Ziele für die Einschränkung der Tabakwerbung und des Verkaufs von Tabakwaren an Jugendliche. Die Konvention beruht auf der Erkenntnis, dass Menschen, die bis zum Alter von 24 Jahren nicht geraucht haben, zu 95 Prozent für den Rest ihres Lebens Nichtraucher bleiben. Nun geht es darum, die Bemühungen zur Erreichung dieses Ziels zu intensivieren.

2. Den Kindern erste Priorität geben. Mit zwei prinzipiell einfachen Maßnahmen lassen sich Krankheiten und Behinderungen bei Kindern stark eindämmen: Man versorge die Unterernährten ausreichend mit Kalorien und Nährstoffen, die Überernährten mit ausgewogener Kost und mehr Gelegenheit zu körperlicher Bewegung. Und man impfe alle Kinder gegen die wichtigsten Krankheiten.

3. Die Millennium-Ziele der Vereinten Nationen verfolgen und dadurch Ungleichheiten abbauen.
Diese Ziele definieren eine medizinische Basisversorgung der gesamten Weltbevölkerung, darunter Impfungen im Kindesalter, Behandlung von Aids, Tuberkulose und Malaria sowie Maßnahmen zur Reduktion von Todesfällen bei Schwangerschaft und Entbindung.

4. Epidemiologische Daten in die Pläne einbeziehen.
Daten zum Verlust gesunder Lebensjahre durch Krankheit, Verletzung oder vorzeitigen Tod helfen den Ländern, ihre Gesundheitsausgaben optimal zu planen. Die Informationen können zudem dazu dienen, die jeweilige Regierung für das Wohlergehen ihrer Bevölkerung verantwortlich zu machen.

5. Die Abwanderung medizinischen Personals stoppen.
Wer seine medizinische Ausbildung im Ausland absolviert, sollte zur Rückkehr in sein Heimatland animiert werden. Reiche Länder sollten die Ausbildung medizinischen Personals in den ärmeren Regionen unterstützen und Bedingungen schaffen, die den Verbleib der Ärzte und Pflegekräfte in ihrem Heimatland fördern und den durch Abwanderung bedingten Verlust ausgleichen. Was nützen die besten Medikamente und Impfstoffe, wenn niemand sie verabreicht?

6. Ein leistungsfähiges Überwachungssystem für Infektionskrankheiten aufbauen.
Dieses System soll möglichst alle Gefahren durch Krankheitserreger erfassen, darunter auch bioterroristische Angriffe und neuartige Infektionskrankheiten. Die Gesundheitsbehörden der verschiedenen Länder sollten enger zusammenarbeiten, sodass im Ernstfall rasch gehandelt werden kann.

7. Umweltgefahren reduzieren. Eine internationale Institution sollte globale Richtlinien für die Reinhaltung von Luft und Wasser aufstellen und die ökonomischen Folgen umweltbedingter chronischer Erkrankungen ermitteln.

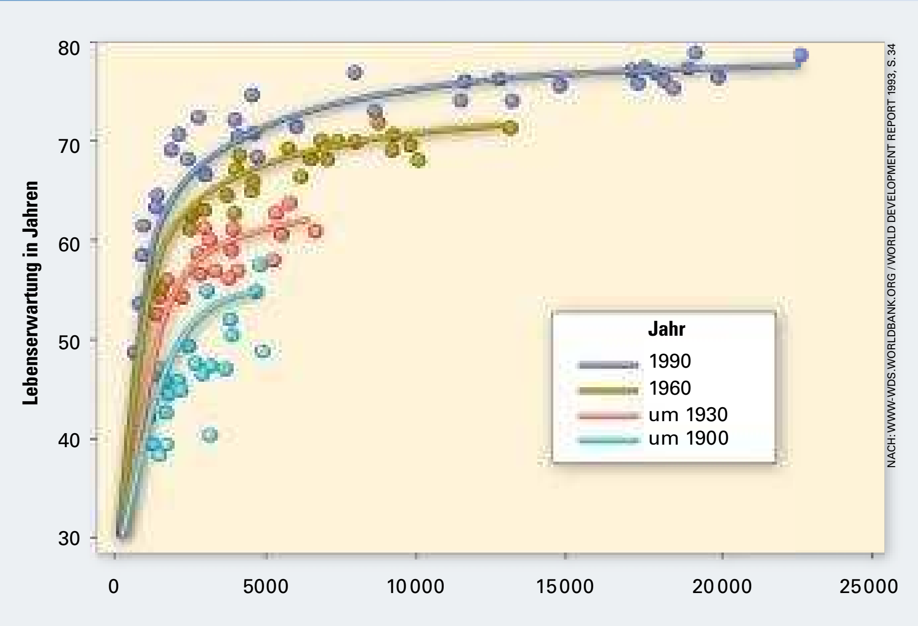
8. Eine globale Koordinationsstruktur aufbauen.
Wegen der besonderen Komplexität des Problems werden sich Verbesserungen in der Gesundheit der Weltbevölkerung nur dann realisieren lassen, wenn neue Formen der Kooperation zwischen Regierungen, Nichtregierungsorganisationen, Industrie und Universitäten entstehen. Gesundheitsfragen sind untrennbar verknüpft mit Bildung, Finanzen, Verkehrswesen, Handel, Einwanderung, Kommunikation und Umwelt. In jeder Regierung ist daher auch der Gesundheitsminister auf die Unterstützung seiner Kollegen aus den anderen Ressorts angewiesen.


AP PHOTO

Zwölfjähriger Raucher in China

Reiche leben länger, und Alte sterben reicher

Wohlstand fördert die Gesundheit. An der Korrelation zwischen der Lebenserwartung bei Geburt und dem Pro-Kopf-Einkommen zeigt sich die Bedeutung des Einkommens für die Lebenserwartung (jeder Punkt der Grafik steht für ein Land). Umgekehrt fördert auch die Gesundheit den Wohlstand: Je länger ein Mensch lebt, desto mehr kann er zum Bruttosozialprodukt beitragen. Geld ist jedoch nur einer der Faktoren, die über Gesundheit und Krankheit entscheiden. Die Einwohner der reichsten Länder hatten um 1900 eine wesentlich kürzere Lebenserwartung als Menschen in Ländern mit vergleichbarem Durchschnittseinkommen im Jahr 1990, unter anderem weil ihnen die moderne Medizin und öffentliche Gesundheitsvorsorge nicht zur Verfügung standen.



Asthmatikern aus Kalifornien zu schaffen; wenn das so ist, wird sich das Problem nicht ohne Beteiligung der chinesischen Regierung lösen lassen. Europäer kennen das Problem mit den verschmutzenden oder verschmutzten Nachbarstaaten in wesentlich geringerer Entfernung. Sollte sich durch die globale Erwärmung die Malaria weiter nach Norden ausbreiten, ist dem auf lange Sicht nur durch eine Reduktion der Treibhausgase zu begegnen, an der sich dann auch die USA beteiligen müssten. Die Welt braucht eine Organisationsstruktur, in der gesundheitspolitische Konflikte – gemeinsam mit solchen in Wirtschaft, Umwelt und Sicherheit – ausgehandelt werden können.

Ende der Abwanderung

Darüber hinaus braucht jedes Land sein eigenes System der Gesundheitsvorsorge, mit funktionierenden Behörden, medizinischen Ausbildungsstätten und personell ausreichend besetzten Krankenhäusern. Aber genau daran herrscht in vielen Ländern der Welt bitterer Mangel. Der wird dadurch verschärft, dass gut ausgebildetes Personal wegen höherer Löhne und besserer Arbeitsbedingungen aus den Entwicklungsländern in die reicheren Staaten abwandert. Die Statistik spricht für sich: Innerhalb eines einzigen Jahrs zogen 30 Prozent aller Krankenschwestern Sambias nach Großbritannien. Noch dramatischer sind die Zahlen für die Philippinen. In Malawi ist ein Großteil des medizinischen Personals emigriert oder selbst Infektionskrankheiten zum Opfer gefallen, sodass drei von vier Stellen für Krankenschwestern unbesetzt sind. In Südafrika sind wegen einer ähnlichen Auswanderungswelle 4000 Stellen für Ärzte und 32 000 für Pflegekräfte frei.

Welche Welt unsere Nachkommen in den Jahren nach 2050 bewohnen werden, hängt in hohem Maß davon ab, wie Medizin, Politik und Gesundheitssektor in der Zukunft auf diese Herausforderungen reagieren. Wird der Kampf um Gesundheit, Stabilität und menschenwürdige Lebensbedingungen für alle, die heute unter Armut und Krankheiten leiden, erfolgreich sein? Werden medizinisches Wissen und Technologien, die in den Industrieländern als selbstverständlich gelten, die Menschen erreichen, denen es heute noch an sauberem Wasser oder einfachsten Medikamenten mangelt? Werden wir in einer Welt leben, in der Erkrankungsraten und Sterbeziffern stetig steigen und zunehmende Ungleichheit und Ungerechtigkeit zu beklagen sind? Oder werden wir uns über Fortschritte in der Gesundheitsvorsorge, gerechteren Zugang zu medizinischer Versorgung und Chancen für wirtschaftliches Wachstum in allen Teilen der Welt freuen dürfen?

Die internationalen, nationalen und lokalen Strukturen, die einem Großteil der Menschheit gute Gesundheit verschaffen könnten, fehlen bis heute weit gehend – ebenso wie klare Visionen für die Gestaltung der Zukunft. Niemand kann mit Sicherheit vorhersagen, welche Welt wir unseren Kindern vererben werden. Nur eines erscheint sicher: Rasche Fortschritte der biomedizinischen Forschung können zusammen mit koordinierten Strategien zur Gesundheitsförderung zur Schaffung einer stabileren und gerechteren Zukunft beitragen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Barry R. Bloom ist Professor für öffentliches Gesundheitswesen *(Public Health)* und Dekan des zugehörigen Fachbereichs an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). Als einer der führenden Experten seines Fachs arbeitet er seit 30 Jahren mit der Weltgesundheitsorganisation zusammen, war als Sachverständiger für das Weiße Haus tätig und gehört zahlreichen nationalen Beratergremien und wissenschaftlichen Gesellschaften an. Nach dem Studium am Amherst College und der Harvard-Universität promovierte Bloom an der Rockefeller-Universität in New York.

Burden of disease – implications for future research. Von C. M. Michaud, C. J. Murray und B. R. Bloom in: Journal of the American Medical Association, Bd. 285, S. 535, Februar 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Gute Luft als Ware

Der Handel mit Emissionsrechten für Treibhausgase soll Umweltschutz für Unternehmen attraktiv machen. Wie viel Politik benötigt ein solcher Markt?

Von W. Wayt Gibbs und Klaus-Dieter Linsmeier

Wenn Forscher auf die drängendsten Probleme unserer Welt hinweisen und Lösungsvorschläge entwickeln, wie in den Beiträgen dieser Serie vorgestellt, ist leider erst ein kleiner Schritt zur Zukunftssicherung getan. Experten mögen vorrechnen, welche Maßnahmen bei vertretbarem Aufwand am meisten bringen oder wie teuer uns Nichtstun kommt – die Geschicke der Menschheit lenken sie nicht. Was letztlich geschieht, ergibt sich meist aus dem Zusammenspiel zweier keineswegs perfekter sozialer Regelmechanismen: der Politik und des Markts. Zwar sind sich die Regierungen der Industrieländer darin einig, die Armut in der Dritten Welt zu bekämpfen. Die G8-Staaten beschlossen erst in diesem Sommer eine Verdopplung der Entwicklungshilfe gegenüber dem Stand von 2004, einen massiven Schuldenerlass für die ärmsten Länder sowie den Abbau von Handelshemmnissen. Doch gerade bei den größten Umweltproblemen dieser Welt herrscht alles andere als Konsens.

Obendrein beschränkt die zeitliche Befristung demokratischer Regierungen deren Planungshorizont auf bestenfalls zehn Jahre. Langfristige Strategien scheitern an den strukturellen Gegebenheiten der Politik, gilt doch eine Neuorientierung nach einem Machtwechsel als Zeichen von Fortschritt. Hinzu kommt, dass die Komplexität von Umweltthemen oft keine eindeutige wissenschaftliche Aussage zulässt, was endlose politische Debatten zur Folge haben kann.

Ökonomen drängen deshalb darauf, Marktmechanismen den Vorzug gegenüber staatlicher Steuerung zu geben. Schließlich sei der Wohlstand der Industrieländer freien Märkten zu verdanken, obwohl doch jeder daran Beteiligte nur auf seinen eigenen Vorteil bedacht sei. Marktwirtschaftliche Instrumente arbeiteten schneller und effektiver, sie seien auch kostengünstiger als staatliche Steuerungsmechanismen. Wohlkonzipierte und sorgfältig überwachte Märkte, vergleichbar den Aktienbörsen, könnten nach Ansicht dieser Ökonomen helfen, die Erwärmung unserer Atmosphäre aufzuhalten, Süßwasserressourcen zu schützen, der Überfischung Einhalt zu gebieten und gefährdete Arten zu bewahren. Auch die oft stark divergierenden Werte unterschiedlicher Interessengruppen wie Umweltschützer auf der einen, Industrieunternehmen auf der anderen Seite ließen sich über eine gemeinsame »Währung« leichter unter einen Hut bringen. Diese Sicht gewinnt derzeit viele Anhänger. Doch Kritiker weisen darauf hin, dass der Teufel im Detail liegt: Was bedeutet eigentlich »wohlkonzipiert« und »sorgfältig überwacht«?

Die Begeisterung für eine marktbasierte Regulierung beruht vor allem auf den Ergebnissen eines Pilotprogramms, das 1990 in den USA initiiert wurde. Damals verabschiedete der Kongress eine Zusatzklausel zum Luftreinhaltungsgesetz (»Clean Air Act«), die den Ausstoß von Kraftwerken an Schwefeldioxid (SO_2) wirksamer reduzieren sollte, als es fixe Grenzwerte vermochten. Dieses Gas macht Regen sauer, die großen Süßwas-

Kraftwerke und energieintensive Unternehmen in der Europäischen Union erhalten neuerdings handelbare Zertifikate, die für jede Anlage die maximale Kohlendioxidemission vorgeben.

eressourcen im Nordosten der USA weisen bereits bedenkliche Werte auf.

Seit 1990 schreibt ein US-Bundesgesetz nun einen Grenzwert für den Gesamtausstoß aller Kraftwerke vor, den Betreibern der einzelnen Anlagen bleibt damit Spielraum. Von der amerikanischen Umweltbehörde EPA auf einer jährlichen Auktion verkaufte Emissionsrechte bieten ihnen die Möglichkeit, wirtschaftlich etwas für die Umwelt zu tun. Weil sich die Behörde an früheren Daten orientiert, erhalten »Dreckschleudern« mehr Zertifikate, schon sehr sauber arbeitende Kraftwerke weniger. Werden Erstere entsprechend aufgerüstet, statt die Rechte zu nutzen, können diese frei verkauft werden, was den Betreibern der zweiten Kategorie nutzt, die für nur geringe weitere Verbesserungen einigen Aufwand treiben müssten. Angebot und Nachfrage bestimmen dann den Preis für das Recht, eine Tonne Schadstoff in die Luft zu blasen. Der tatsächliche Ausstoß wird von der EPA überwacht. Schrittweise Senkung des Gesamtgrenzwerts sollte die Belastung der Gewässer im Nordosten über die Jahre verbessern. Ein solches Konzept wird als Cap-and-Trade-System bezeichnet (nach dem englischen *cap* für »Deckel«, *trade* für »Handel«).

Die Rechnung schien aufzugehen: Nach Angaben der EPA förderte das Programm die Nachfrage nach SO_2-Filtern derart, dass deren Preis innerhalb weniger Jahre um 40 Prozent zurückging, während ihre Effektivität von 90 auf 95 Prozent stieg. Zudem sank im Nordosten der USA die Säurekonzentration im Regen. Nach Schätzungen des RFF (Resources for the Future), einem unabhängigen Umwelt- und Wirtschaftsforschungsinstitut in Washington, kostet das Programm bis zum Jahr 2010 etwa eine Milliarde Dollar jährlich. Hätte die Umweltbehörde für alle Kraftwerke feste Grenzwerte vorgeschrieben, wären die Investitionen 30 bis 50 Prozent höher ausgefallen. Das US-Schwefeldioxidprogramm gilt deshalb als Triumph der freien Marktwirtschaft und als wegweisendes Modell.

Leider trüben jüngere Studien das schöne Bild. Denn die ökologisch schädliche Übersäuerung der Flüsse und Seen hat das Modell bislang kaum verringern können. Ein Großteil der belasteten Gewässer in den kritischen Regionen war nach Angaben der EPA auch im Jahr 2002 noch nicht wieder »gesund«. Charles T. Driscoll von der Universität Syracuse (Bundesstaat New York) und neun weitere Wissenschaftler kamen in einer gemeinsamen Analyse 2001 zu dem Schluss, dass die Emissionsreduktionsziele einfach viel zu zaghaft angesetzt waren. Viele der Gewässer im amerikanischen Nordosten könnten sich selbst in den nächsten 25 bis 50 Jahren nicht völlig erholen. Hier offenbart sich nach Ansicht des RFF eine Schwäche des Konzepts: Die Grenzwerte wurden und werden jeweils vom Kongress, nicht aber von den Wissenschaftlern der Umweltbehörde beschlossen. Somit konnte das System nicht neuen Erkenntnissen angepasst werden, denen zufolge einerseits Schwefeldioxid für den Menschen schädlicher sei als bisher angenommen, sich andererseits übersäuerte Gewässer langsamer erholen als erwartet. So wie eine Zentralbank die Geldmenge eines Lan- ▶

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Handelbare Fischfangquoten brachten in den USA Erfolg, wo rigide Fangbeschränkungen versagten.

des kontrolliert, sollte eine Aufsichtsstelle deshalb Emissionsobergrenzen neu justieren, wenn besser gesicherte Erkenntnisse dies erfordern. Kritiker verweisen außerdem auf einen weiteren Schwachpunkt des Konzepts: Über einen summarischen Grenzwert lasse sich nicht garantieren, dass gerade diejenigen Verschmutzer in Umwelttechnik investieren, deren Emissionen in Ballungsräumen die Gesundheit vieler belastet.

Leider kamen diese Einsichten für das derzeit größte Cap-and-Trade-Projekt zu spät: Als die Industrienationen mit Ausnahme der USA und Australien 1997 in Kioto einen internationalen Emissionshandel für den Ausstoß von insgesamt sechs Treibhausgasen beschlossen, sahen sie die Möglichkeit einer Anpassung an den Stand der Forschung nicht vor – die damals ausgehandelten Ziele gelten noch bis 2012. Mit dem In-Kraft-Treten des Protokolls am 16. Februar 2005 verpflichteten sich die zeichnenden Staaten, ihre Treibhausgas-Emissionen in der Zeit von 2008 bis 2012 um fünf Prozent gegenüber dem Niveau von 1990 zu verringern (zur Vereinheitlichung wird der Ausstoß der verschiedenen Gase in Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente mit gleichem Treibhauseffekt umgerechnet). Die Europäische Union strebt bei Kohlendioxid eine Verringerung um acht Prozent an, die Bundesrepublik eine Minderung um 21 Prozent.

Wie der amerikanische »Clean Air Act« schuf das Kioto-Protokoll eine Ware aus dem Nichts: In der europäischen Union ist dies der Handel mit Rechten zum Ausstoß von Kohlendioxid. Die Zertifikate werden von den Regierungen kostenlos an Kraftwerke, Metall verarbeitende Betriebe und andere energieintensive Branchen vergeben. Wie viele Tonnen CO_2 ausgestoßen werden dürfen und nach welchen Regeln sich diese Gesamtzahl auf die einzelnen Anlagen verteilt, wurde 2004 in »Nationalen Allokationsplänen« fixiert. Basis der Zuteilungen waren in der Regel die Emissionen der einzelnen Anlagen in den Jahren 2000 bis 2002.

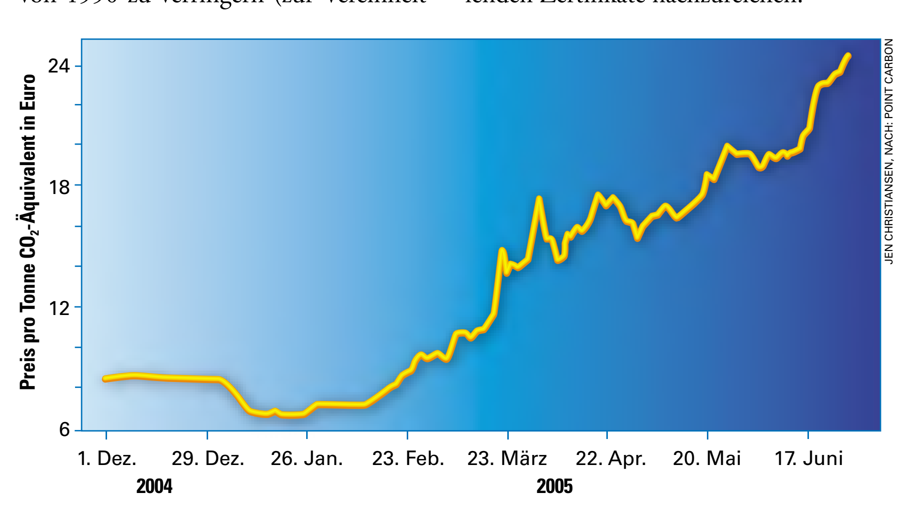
Gute Luft für China

Das hätte freilich nicht gereicht, um die Unternehmen zu kostspieligen Maßnahmen zu motivieren. Deshalb wurden die Zuteilungen etwas reduziert, sofern die Anlagenbetreiber nicht bereits in klimaschonende Techniken investiert hatten. Übersteigt der CO_2-Ausstoß eines Betriebs die ihm zugeteilte Menge oder möchte er neue Anlagen installieren, muss er Zertifikate zum Marktpreis nachkaufen. Verschmutzungsrechte werden bei der Deutschen Emissionshandelsstelle des Umweltbundesamts registriert. Wer mehr Treibhausgas in die Atmosphäre abgibt, als ihm zusteht, muss mit Sanktionen rechnen: Für die Zeit von 2005 bis 2007 kostet eine Tonne Kohlendioxid 40 Euro, zudem sind die fehlenden Zertifikate nachzureichen.

Seit der Einrichtung dieses Markts im Januar hat der Wettbewerb der Länder und Unternehmen um die Verschmutzungsrechte das Handelsvolumen auf zwei Millionen Tonnen pro Tag steigen lassen. Etwa 20 Prozent der EU-Zertifikate werden gehandelt, das sind etwa 1 bis 1,5 Millionen pro Tag. Ihr Preis scheint sich bei etwa 23,50 Euro zu stabilisieren, allerdings sind 11 der 25 Mitgliedsstaaten mit ihren Registern noch nicht an das europäische Zentralregister CITL angeschlossen.

Im Rahmen des Kioto-Protokolls sieht der europäische Emissionshandel zudem weitere Möglichkeiten vor, durch aktiven Umweltschutz Nutzungsrechte zu erwerben. Wer zum Beispiel in China ein gasgefeuertes Kraftwerk baut, das die eingesetzte Energie dank neuester Technologie mit einem Wirkungsgrad von 56 statt dort üblichen 48 Prozent verstromt, kann sich die Differenz gutschreiben lassen, denn der Treibhauseffekt kennt keine Landesgrenzen. Noch deutlicher fällt der Unterschied aus, wenn ein bestehendes Kohlekraftwerk dank westlicher Hilfe ersetzt wird. Angesichts der insbesondere in der Dritten Welt wesentlich geringeren Investitionskosten ist das eine verlockende Alternative. Ein weites Spektrum solcher Projekte wurde im Februar dieses Jahres in Amsterdam anlässlich einer Konferenz von Risikokapitalgebern vorgestellt. In Brasilien werden die Methanausgasungen von zwei gigantischen Müllhalden als Brennstoff zur Stromerzeugung genutzt und dadurch 670 000 Tonnen Kohlendioxid-Äquivalente eingespart. Ein Windpark in China soll saubere Energie erzeugen und jährlich 51 000 Tonnen CO_2 einsparen.

Derzeit warten 180 solcher Projekte auf ihre Genehmigung durch den von den Vereinten Nationen eingesetzten Exekutivrat, erst 19 wurden genehmigt (Stand: Oktober 2005). Das Gremium hat aber bereits Schritte unternommen, das Verfahren zu vereinfachen. Das ist auch sehr wichtig, denn nach Schätzungen der Beratungsagentur Natsource wer-



Der Wettbewerb um die Emissionsrechte hat die Preise in die Höhe schnellen lassen. Im Juli kosteten Zertifikate zur Produktion einer Kilowattstunde Energie aus Kohle erstmals mehr als der Rohstoff selbst.



Ein Bauernhof der Zukunft

Jene Dienste, die uns die Natur leistet und die wir bislang so selbstverständlich hingenommen haben, könnten künftig vielleicht die Hälfte des Einkommens eines Bauern ausmachen. Vorausgesetzt, die neu zu schaffenden Märkte für Umweltguthaben (Credits) funktionieren wie erhofft, bietet gerade der Agrarsektor eine Vielzahl von Ökosystemleistungen.

Biodiversitäts-Credits
Umweltschutzorganisationen pachten die Nutzungsrechte unberührter Lebensräume, die seltene Arten und gefährdete Biotope enthalten.



CO_2-Credits
Ein Landeigentümer erhält Gutschriften für das Anlegen neuer Wälder. Diese veräußert er an Industrieunternehmen, die damit Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen erreichen.

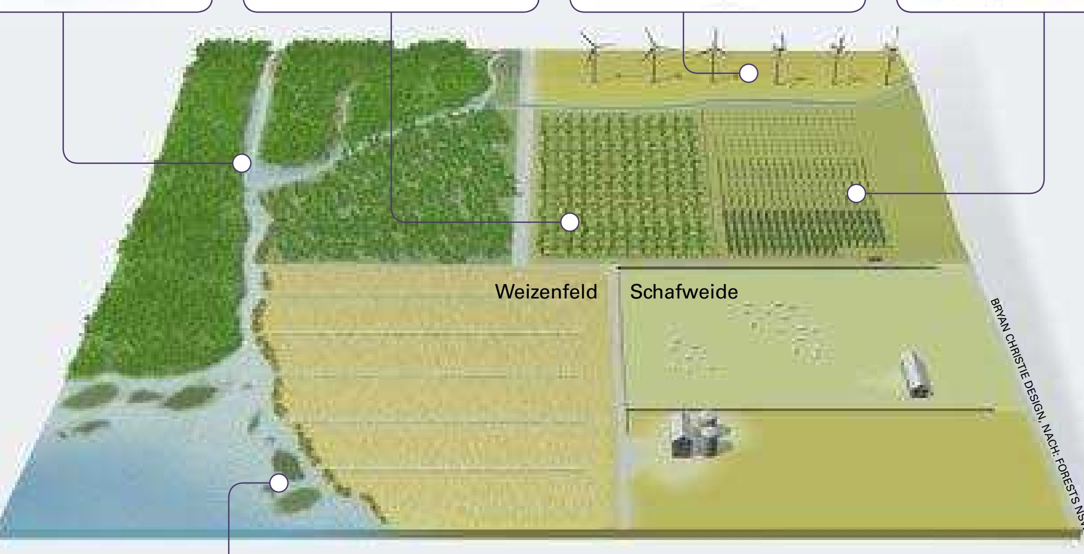


Erneuerbare Energien
Windparks erzeugen saubere Elektrizität, die Höchstpreise erzielen sollte. Die Turbinen bringen außerdem Steuerersparnisse ein, die Anschaffungs- und Betriebskosten reduzieren.



Nachhaltige Forstwirtschaft
Nachhaltig erzeugtes Nutzholz ist heute eines von zahlreichen als besonders umweltverträglich zertifizierten »Öko«-Produkten und wird auf Nischenmärkten mit einem Aufschlag verkauft.





Wasser-Credits
Der sorgsame Umgang mit Wasser und Feuchtgebieten ist in vielerlei Hinsicht wirtschaftlich wertvoll. Örtliche Versorgungswerke erwerben Guthaben, um die Qualität ihrer Wassereinzugsgebiete zu schützen. Feuchtgebiete erbringen aber diverse Dienstleistungen, die Gutschriften sind also für verschiedene Zielgruppen von Interesse: Staatliche Behörden profitieren von der Rückhaltefunktion bei Überschwemmungen; Umweltschutzorganisationen wollen Brutgebiete von Wasserzugvögeln erhalten; Agrarkooperativen nutzen den gut gefüllten Grundwasserspiegel und müssen weniger gegen die bei künstlicher Bewässerung häufig problematische Bodenversalzung tun.



Ware	Prozentualer Anteil am Einkommen	Kunde
Biodiversitäts-Credits	5	Umweltverbände
CO_2-Gutschrift	10	Stahlindustrie
Erneuerbare Energien	15	Strommarkt
Holz aus nachhaltiger Produktion	20	Nischenmärkte
Wasser-Credits	20	Kommunale Wasserversorger
Weizen	15	Weltmarkt
Wolle	15	Weltmarkt

▷ den die Europäische Union, Japan und Kanada ungefähr 3,5 Milliarden Tonnen mehr CO_2 produzieren, als ihnen der Vertrag in der Zeitspanne von 2008 bis 2012 zugesteht. Der Umweltanalyst Kristian Tangen vom norwegischen Beratungsbüro Point Carbon glaubt eher an fast fünf Milliarden. Nach Vorhersagen seines Unternehmens werden handelbare Gutschriften bis zum Jahr 2007 gerade mal den Wert von 0,03 Milliarden Tonnen, bis 2012 kaum eine Milliarde erreichen. Angesichts solcher Unwägbarkeiten erklärte Tashiyuki Sakamoto vom japanischen Wirtschaftsministerium auf der Konferenz im Februar, er sei nicht überzeugt, dass dieses Instrument dazu geeignet sein wird, den Klimawandel aufzuhalten.

Vor allem müssten dazu nach Ansicht vieler Experten die USA mit einsteigen. Im Dezember 2004 drängte eine amerikanische Kommission ihre Regierung, einen nationalen Emissionshandel für Treibhausgase in die Wege zu leiten. Im Juni dieses Jahres lehnte der amerikanische Senat einen entsprechenden Antrag zum zweiten Mal innerhalb von zwei Jahren ab.

Ein hochriskantes Experiment

Kaum einen Monat später verabschiedete er jedoch eine nicht bindende Resolution zur Einführung »obligatorischer marktbasierter Grenzwerte« für den Ausstoß klimawirksamer Gase. Zudem haben neun Bundesstaaten im Nordosten einen regionalen Kohlendioxidmarkt beschlossen. Dem Vernehmen nach sind Optionen zum Erwerb europäischer Zertifikate und von Gutschriften aus umweltfreundlichen Projekten in Entwicklungsländern vorgesehen.

Viele Wissenschaftler mahnen jedoch zur Vorsicht, der Kohlendioxidmarkt sei ein hochriskantes Experiment, dessen Bewährungsprobe noch aussteht. Angesichts von Betrugsversuchen in anderen Cap-and-Trade-Märkten in den USA und England, aber auch eingedenk massiver Täuschungen börsennotierter Unternehmen über ihre wahre wirtschaftliche Lage warnt RFF-Mitarbeiterin Ruth Greenspan Bell: »Wenn dergleichen in Ländern mit einem gut entwickelten Rechtsstaat möglich ist, was müssen wir dann vom Emissionshandel in Staaten erwarten, deren Eigentumsrechte wenig entwickelt sind, in denen Korruption die Regel ist und wo die Öffentlichkeit weit gehend vom Geschehen ausgeschlossen ist? Verschmutzte Luft ist eine schwer zu dokumentierende Ware!«

Ein gut funktionierender Markt erfordert mehr als nur Käufer und Anbie-

Neue Märkte für Ökosystemleistungen

Rund um die Welt entstehen Projekte, die Kräfte von Wettbewerb und Eigeninteresse zu Gunsten der Umwelt nutzen. Wie erfolgreich diese neuen Handelssysteme sein werden, muss sich erst noch erweisen. Ein funktionsfähiger Markt braucht genau definierte Güter, die reibungslose Abläufe erst ermöglichen; eine zentrale Überwachungsstelle, die Vertrauen in den Markt schafft, und ein ausreichendes Handelsvolumen, um den Wettbewerb lebendig zu erhalten.

Marktziel	Produkte	Anbieter	Kunden	Zentralstelle	Handelsvolumen
wider die globale Erwärmung	Europäische Union und Australien: Emissionsrechte zum Ausstoß von Treibhausgasen entsprechend einer Tonne CO_2; Projektgutschriften und Erlasskredite für die Reduktion beziehungsweise die Vermeidung des Ausstoßes von einer Tonne CO_2-Äquivalent	Regierung gibt Lizenzen aus; Gutschriften für Projekte, die den Ausstoß an Treibhausgasen in anderen Ländern, zum Beispiel der Dritten Welt, reduzieren	Kraftwerke, Metallproduktion und andere Industriezweige; Umweltorganisationen	EU: Europäisches Zentralregister (CITL) für den Emissionshandel, in der BRD die Deutsche Emissionshandelsstelle des Umweltbundesamts Australien: die Organisation Forests NSW	EU: täglicher Umsatz von Lizenzen im Wert von zwei Millionen Tonnen Australien: Im letzten Jahr wurden 166 000 Credits gehandelt.
Schutz der Wasserressourcen	USA: Einheit von 0,405 Hektar renaturierter oder neu geschaffener Feuchtflächen Mexiko: Einheit von einem Hektar geschützter Waldfläche	USA: Private »Mitigation Banks« Mexiko: Eigentümer der Waldflächen	USA: Bauträger, die Feuchtgebiete versiegeln Mexiko: Wasserkunden und Forstverwaltung	USA: »Mitigation Banks« unter Aufsicht der Regierung Mexiko: Ehrenamtliche Inspektoren überwachen Einhaltung der Verträge.	USA: etwa 9300 Hektar Feuchtfläche in der Verantwortung der Banken Mexiko: Verträge umfassen 312 000 Hektar Waldfläche.
Erhaltung von Lebensräumen	USA: 0,405 Hektar gefährdeter Biotope Costa Rica: ein Hektar Wald	USA: private Umwelt-Banken Costa Rica: Landeigentümer	USA: Bauträger, die Lebensräume gefährdeter Arten zerstören Costa Rica: Regierung, gemeinnützige Organisationen	USA: Private Umwelt-Banken unter Aufsicht des US Fish and Wildlife Service Costa Rica: Regierung	USA: bis Mai 2005 etwa 44 500 Hektar in der Verantwortung der Banken Costa Rica: fast 1,1 Millionen Hektar
nachhaltige Fischerei	USA und Neuseeland: Lizenz zum Fang einer spezifizierten Gewichtsmenge der jeweiligen Fischart	Regierung vergibt Lizenzen anhand der Fischpopulation; aus dem Geschäft scheidende Fischer verkaufen ihre Quoten.	Fischfangflotten	staatlich lizenzierte Broker und Funginspektoren wie FishServe in Neuseeland	Tausende von Transaktionen jährlich in den USA, Neuseeland und anderen Ländern

ter knapper Güter. Florieren kann der Wettbewerb erst, wenn die Ware standardisiert und genau spezifiziert ist. Des Weiteren benötigen Anleger eine vertrauenswürdige Börse und ein Handelsvolumen, das groß genug ist, um einen Verkauf zu jedem vom Anbieter gewünschten Zeitpunkt zu ermöglichen. Nun fehlt vielen der neu geschaffenen Märkte für Umweltschutz die eine oder andere Zutat. Und wie der Handel mit Schwefeldioxidzertifikaten zeigt, kann ein solches System zwar reibungslos arbeiten, das eigentliche ökologische Ziel aber trotzdem verfehlen.

Doch ob Gewässer- oder Biotopschutz, Treibhausgasreduktion oder Fischfangquoten – zwangsläufig stecken alle derartigen Projekte noch in den Kinderschuhen, ihre Entwickler werden mit der Zeit dazulernen. Selbst ein schlecht funktionierender Markt kann besser sein als keiner. Beispielsweise wurde im Jahr 1972 in den USA ein nationales Gewässerschutzgesetz (»Clean Water Act«) verabschiedet, das den ökologischen Wert von Feuchtgebieten anerkennt: Sie reinigen Wasserressourcen, reduzieren die Gefahr sowohl von Dürren als auch von Überschwemmungen und bieten gefährdeten Arten Lebensraum.

Gewinn durch Renaturierung

Daher verlangte das Gesetz, dass ein Bauträger, der Feuchtgebiete trockenlegt oder sonstwie zerstört, eine gleich große Fläche andernorts renaturiert oder neu schafft. Doch der Erfolg blieb aus: Von 1985 bis 1995 wurden dennoch mehr als 405 000 Hektar Marsch- und Sumpfland durch Erschließung geschädigt oder zerstört.

Daher schlug die US-Regierung vor etwa zehn Jahren einen neuen Kurs ein und erlaubte den Erschließungsgesellschaften, ihren gesetzlichen Verpflichtungen flexibel nachzukommen. »Mitigation Banks« genannte Finanzinstitute sanieren geeignete Flächen und verkaufen dieses Plus für die Umwelt in Form so genannter Credits an Bauträger. Die setzen sie bei Genehmigungsverfahren ein und kommen so den Auflagen des Clean Water Acts nach. Mit einem Schlag wurde aus einer Umweltauflage ein Geschäft! Heute gibt es in den USA rund 500 solcher Institute und ihr Geschäft boomt: Nach Angaben der Internetplattform »Ecosystem Marketplace« wurden bereits mehr als 9000 Hektar Sumpfland saniert und dafür Credits im Wert von fast 300 Millionen US-Dollar ausgegeben.

Einen etwas anderen Ansatz wählte Mexiko, um seine Wälder zu schützen: Die staatliche Forstbehörde zahlt Landbesitzern und Wald besitzenden Kooperativen eine jährliche Prämie von etwa 4,5 bis 6 Dollar je Hektar, wenn sie sich verpflichten, auf Holzeinschlag beziehungsweise landwirtschaftliche Nutzung in bestimmten Regionen zu verzichten. Diese Initiative ist eine Notmaßnahme, denn die Entwaldung schreitet in Mexiko mit der weltweit zweithöchsten Rate voran. Die Folgen sind Bodenerosion und Wasserknappheit sowie Rückgang der Artenvielfalt von Tieren und Pflanzen. Die Initiative Mexikos ist Teil eines zurzeit in vielen Ländern und Projekten erprobten Konzepts, Dienstleistungen der Natur (environmental services) in Geld umzurechnen und dafür einen Markt zu schaffen. In diesem Fall soll die Fähigkeit von Wäldern bewertet werden, die Wasserversorgung zu gewährleisten. Dieses Programm, das bis Dezember 2004 weit mehr als 300 000 Hektar umfasste, kostete mindestens 150 Millionen US-Dollar. Allerdings soll die Finanzierung schrittweise auf die Nutznießer von Wasser verlagert werden.

Dass beim marktregulierten Modell sowohl Ökologie als auch Ökonomie gewinnen, lässt sich auch am Beispiel handelbarer Fischfangquoten illustrieren. Mitte der 1990er Jahre war der Heilbuttbestand vor Alaska so weit dezimiert, dass die US-Regierung die Fangsaison auf 48 Stunden pro Jahr beschränken musste. Doch mit der Einführung handelbarer Fangquoten im Jahr 1995 brachen für Fische und Fischer bessere Zeiten an. Letzteren stand nun eine einfache und Gewinn bringende Möglichkeit offen, sich aus dem Geschäft zurückzuziehen: der Verkauf der Quoten. Das System reduzierte das Überangebot, wodurch der Heilbuttpreis und damit auch das Einkommen der Fischer nach oben kletterten, während sich die Fischbestände allmählich erholten. In diesem Jahr dauert die Heilbuttsaison 258 Tage. Das weltweit umfangreichste Fangquotensystem gilt in Neuseeland und umfasst heute 93 Arten.

Die bisher vorliegenden Erfahrungen mit derartigen Märkten lassen den Schluss zu, dass ein solches Konzept in manchen Regionen und für manche Umweltleistungen gut funktioniert, in anderen Fällen aber wirkungslos bleibt. Die im Mai veröffentlichte UN-Studie »Millennium Ecosystem Assessment« enthält die derzeit umfassendste Analyse all jener komplexen Verbindungen, in denen Mensch und Umwelt voneinander abhängen und sich gegenseitig beeinflussen.

Die Studie warnt, dass ein limitierter Zugang zu natürlichen Ressourcen, von dem ein Staat oder gar die Menschheit profitiert, auf Kosten lokaler Gruppen geht und der freie Markt oft keine ausreichende Entschädigung gibt. So sagt denn auch Robert T. Watson, Sprecher der Weltbank in Fragen des Klimawandels, der Markt allein werde die Probleme wohl nicht lösen. Zwar vermag auch die Politik dies nicht allein, doch wo Markt und Staat sich klug verbinden, besteht Hoffnung. ◁


CORBIS, JONATHAN BLAIR

Der amerikanische Handel mit Verschmutzungsrechten für Schwefeldioxid wurde als Triumph gepriesen. Doch die meisten Seen und Flüsse, denen er eigentlich helfen sollte, sind noch heute übersäuert. Säuregeschädigte Wälder haben sich bislang nicht erholt.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE


W. Wayt Gibbs (Foto) ist Redakteur von Scientific American, **Klaus-Dieter Linsmeier** ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Liquid assets. Von Katherine Ellison und Amanda Hawn in: Conservation in Practice, Bd. 6, Heft 2, April – Juni 2005

The role of risk in targeting payments for environmental services. Von Jennifer Alix-Garcia et al. Universität Kalifornien, 2005. www.umt.edu/econ/papers/pes%20targeting.pdf

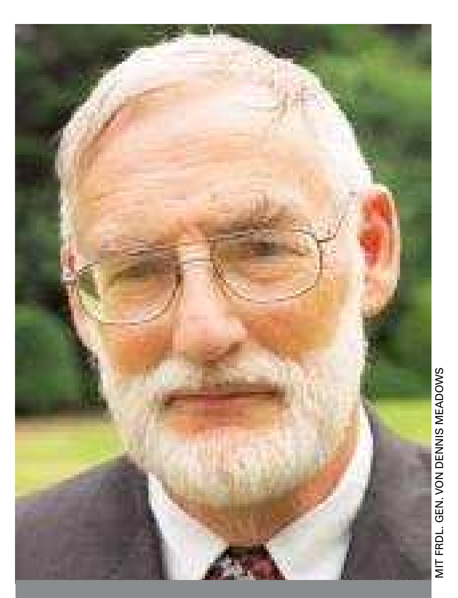
Trading cases. Von James Boyd et al. in: Environmental Science and Technology, Bd. 37, Heft 11, S. 216A, 1. Juni 2003

Informationen des Bundesumweltministeriums zum Emissionshandel unter: http://www.bmu.de/emissionshandel/aktuell/aktuell/1201.php

Diesen Artikel
können Sie auch anhören,
siehe: www.spektrum.de/audio

»Wir haben dreißig Jahre geschlafen«

Vor über dreißig Jahren rüttelte die Studie »Die Grenzen des Wachstums«, die ein Team um Dennis L. Meadows 1972 für den Club of Rome erstellte, die Industrienationen auf. Sie führte der Welt vor Augen, dass unsere Ressourcen nicht unerschöpflich sind. Gerhard Samulat befragte den Ökonomen nach seiner heutigen Sicht.



MIT FRDL. GEN. VON DENNIS MEADOWS

Dennis L. Meadows ist Professor emeritus an der University of New Hampshire und war lange Zeit Direktor des Institute for Policy and Social Science Research. Heute ist er Präsident des Laboratory for Interactive Learning in Durham, USA.

Spektrum: Verstehen Sie Menschen, die Computermodellen nicht trauen?

Meadows: Selbstverständlich! Computermodelle erzeugen kein neues Wissen. Bestenfalls zeigen sie uns die konsequente Entwicklung eines Systems. Doch hängen die Ergebnisse stark von den jeweiligen Grundannahmen ab. Sind die Mutmaßungen unzutreffend oder unzureichend, kann das Modell vollkommen falsche Eindrücke vermitteln.

Nichtsdestoweniger sind Computermodelle objektiv. Jeder kann den verwendeten Algorithmus begutachten und sich dann eine eigene Meinung bilden, ob alle relevanten Parameter ausreichend berücksichtigt wurden. Das ist bei anderen Informationsquellen oft schwieriger. Wenn Ihnen Politiker oder Wirtschaftsführer etwas über die Zukunft sagen, können Sie deren Aussagen in der Regel nicht prüfen.

Spektrum: In Ihren ersten Simulationsrechnungen aus dem Jahr 1972 sahen Sie ein moderates weltweites Wirtschaftswachstum bis zum Jahr 2030 voraus und dann einen Kollaps der Systeme. Haben Sie heute denn bessere Nachrichten für uns?

Meadows: In unserer Studie von 1972 haben wir 13 unterschiedliche Szenarien einer Zukunft bis zum Jahr 2100 veröffentlicht. In allen Simulationen zeigte sich zunächst ein Wachstum der Bevölkerung, der Industrieproduktion, der Nahrungsmittelversorgung und dergleichen. Bis zum Jahr 2010. Danach kam es entweder zu einem Kollaps der Systeme oder – in Abhängigkeit von kulturellen, technologischen oder Marktveränderungen – zu einem Übergang in eine nachhaltige Entwicklung.

Doch mittlerweile hat sich das Blatt gewendet. Vor 30 Jahren gab es noch ausreichend Ressourcen. Damals bestand die Herausforderung darin, den Raubbau zu verlangsamen und der Erde Zeit zu geben, sich zu regenerieren. Heute ist diese Grenze überschritten. Nun gilt es, Wege zu finden, den Verbrauch zurückzufahren. Das ist ein sehr viel schwierigeres Unterfangen. Und leider muss ich feststellen: Wir haben die vergangenen dreißig Jahre geschlafen!

Spektrum: Ist das nicht ein wenig übertrieben? Zumal viele Kritiker behaupten, Ihre Berechnungen beruhen auf zu simplen Annahmen über die Wirkzusammenhänge.

Meadows: Wir wissen doch alle, dass es wichtig ist, politische Debatten mit Zukunftsbildern zu verknüpfen. Aber welche sollen wir nutzen? Ich bin der Überzeugung, dass unser Modell von 1972 trotz all seiner Schwächen genauer, komplexer und nützlicher war als alle heutigen. Und es hat sich als überaus treffsicher erwiesen, was etwa der aktuelle »Millennium Ecosystem Assessment Report« der Vereinten Nationen belegt. Es macht keinen Sinn, eine Prognose zu verwerfen, ohne etwas Besseres in der Hand zu haben.

Spektrum: Andere behaupten, Sie hätten den technologischen Fortschritt weit gehend außer Acht gelassen ...

Meadows: Technologiepolitik ist ein komplexes Feld. Viele glauben, dass sich Innovationen irgendwie unabhängig entwickeln und ausschließlich zum Wohl der Menschen beitragen. Doch werden neue Produkte häufig von denjenigen entwickelt, die die Probleme verursacht haben. Oft verschlimmert Technik die Sache. So gibt es gegenwärtig gewaltige Anstrengungen, schlagkräftige Militärtechnologien zu entwickeln, um den eigenen nationalen Machtkreis zu schützen oder sogar

auszuweiten. Da bleibt nur wenig Geld übrig für die wirklichen Probleme in der Welt, wie etwa die Bekämpfung der Immunschwächekrankheit Aids, die unsere Zukunft mit Sicherheit prägen wird.

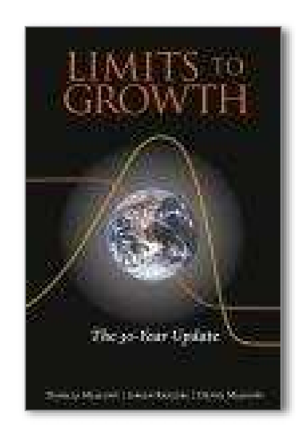
Ich verstehe die komplexen Zusammenhänge technologischer Erneuerungen sehr gut. Ich selbst bin Chemiker und habe meinen Doktortitel am angesehenen Massachusetts Institute of Technology MIT gemacht. Zudem habe ich für die Atomenergiebehörde der Vereinigten Staaten gearbeitet. Ich kann Ihnen versichern, dass wir in unseren Simulationsrechnungen äußerst optimistische Annahmen machten über die technische Entwicklung in der Nahrungsmittelproduktion, für den Rohstoffverbrauch und bei der Umweltüberwachung.

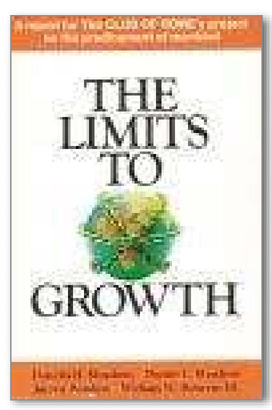
Spektrum: Sind die steigenden Preise für Öl, Stahl und andere Rohstoffe eventuell Vorboten des von Ihnen prognostizierten Niedergangs?

Meadows: Wir haben niemals geglaubt, dass Marktpreise geeignete Indikatoren für die Verknappung von Waren sind. Preise unterliegen zu sehr politischen, ökonomischen und Verbraucherinteressen, die den wahren Wert einer Ware verfälschen. Ähnliches gilt für Produktionskosten, die von Energiepreisen und staatlichen Sozialleistungen abhängen. Sie unterliegen jeweils einer eigener Dynamik. Gleichwohl werden in der kommenden Dekade einige Güter rar werden, sauberes Trinkwasser beispielsweise, landwirtschaftliche Nutzfläche oder auch Erdöl.

Jedenfalls habe ich Paul Ehrlich damals für naiv gehalten, als er in den 1980er Jahren mit Julian Simon gewettet hatte, dass die Rohstoffpreise in den folgenden zehn Jahren steigen werden. Bekanntlich hat er verloren. Nun hat Matthew Simmons, der US-Präsident George W. Bush lange in Energiefragen beriet und Autor des Buchs »Twilight in the Desert – The Coming Saudi Oil Shock and the World Economy« ist, eine ähnliche Wette um steigende Ölpreise angeboten. Das Öl wird sicherlich mit jedem Barrel, das wir pumpen, weniger. Aber Energie ist so wichtig für unsere moderne Gesellschaft, dass die Politik den Preis dafür noch auf Jahre künstlich beeinflusst.

Drei Jahrzehnte liegen zwischen dem Erscheinen dieser beiden Bücher. Der erste Report (ganz rechts) riskierte zwar keine Vorhersagen, sehr wohl aber den Hinweis auf die »prekäre Lage« (predicament) der Menschheit. Im vergangenen Jahr folgte die Aktualisierung.





Wenn ich abschätzen wollte, ob ein Rohstoff wirklich zur Neige geht, dann würde ich untersuchen, wie sich der Energieverbrauch und das benötigte Sachkapital entwickeln, um ihn zu fördern, zu raffinieren und zu transportieren. Wenn dieser Aufwand steigt, bedeutet das nichts anderes, als dass der technologische Fortschritt den Mangel nicht vollständig kompensieren kann.

Spektrum: Wird der zu erwartende ökologische und ökonomische Zusammenbruch soziale Spannungen auslösen?

Meadows: Die Reichen und Mächtigen haben immer einen Weg gefunden, um Not und Entbehrung von sich zu wenden, auch wenn der Rest der Welt sich an einen geringeren Lebensstandard anpassen muss.

Pandemien und globalem Klimawandel entrinnen auch die Industrienationen nicht

Die Frage ist aber, ob sie auch diesmal damit durchkommen werden. Das hängt meiner Ansicht nach davon ab, wie der Übergang sich genau vollzieht, der die Zeiten des Wachstums beendet. Eine ausreichende Ernährung und frisches Wasser werden sich die Industrieländer wahrscheinlich auch künftig leisten können. Pandemien oder dem globalen Klimawandel entkommen sie dagegen nicht.

Größte Aufgabe in naher Zukunft wird jedoch sein zu verhindern, dass Länder oder Interessengruppen zu militärischen Mitteln greifen, weil sie befürchten, zu den Verlierern im globalen Verteilungskampf zu gehören.

Spektrum: Kommen Sie sich mittlerweile nicht vor wie der Rufer in der Wüste, auf den niemand hört? Oder sehen Sie Bewegung in die richtige Richtung?

Meadows: Die meisten, die auf der Welt etwas zu sagen haben, verfolgen noch immer nicht die Politik, die notwendig wäre, um sich auf ein Ende des Wachstums vorzubereiten. Das habe ich auch nie erwartet. Doch muss dringend der schädliche Einfluss der Menschheit auf die globale Ökologie nachlassen. Das könnte durch eine aktive und soziale Politik geschehen. Sonst zwingt uns eine sich drastisch verschlechternde Umwelt zu handeln.

Jene, die mit Hilfe neuer Technologien wie sparsamer Autos, organischen Landbaus oder gesteigerter Ressourceneffizienz einen »geordneten Rückzug« vom stupiden Wachstumsirrweg einschlagen, leisten bestimmt einen guten Dienst. Sie werden die globalen Probleme aber kaum in den Griff bekommen. Da helfen nur grundsätzliche kulturelle Veränderungen, die Wünsche betreffen wie Familiengröße oder den Verbrauch materieller Güter.

Doch gibt es Anzeichen der Hoffnung, betrachtet man beispielsweise das Kioto-Protokoll. Aber die Aktivitäten sind zu gering, sie kommen zu spät und sind oft ungenügend. Wir müssen versuchen, das globale Ökosystem wieder zu stabilisieren, damit wir nach dem zu erwartenden Kollaps eine neue, nachhaltige Gesellschaft aufbauen können. ◁

Die Fragen stellte **Gerhard Samulat**, freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

LITERATUR

Twilight in the desert – the coming saudi oil shock and the world economy. Von Matthew Simmons, ISBN 047173876X, 2005

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Angriff auf die »Wolfsröte«

Der »Lupus erythematodes« gehört zu den fassettenreichsten Autoimmunerkrankungen. Trotzdem finden Molekularwissenschaftler allmählich Gegenstrategien, die zielgenau wirken sollen.

Von Moncef Zouali

Das Erscheinungsbild dieser Krankheit ist besonders vielfältig und darum gerade im Anfangsstadium oft nicht leicht zu diagnostizieren. Hier drei Beispiele: Eine 24-jährige Patientin gelangt zur gründlichen Untersuchung, weil sie an Nierenfunktionsstörungen und an anfallartigen Hirnkrämpfen leidet, die nicht auf Antiepileptika ansprechen. Äußerlich am auffälligsten wirkt der rote Ausschlag im Gesicht, der sich über Nase und Wangen zieht und wegen seiner charakteristischen Form auch als »Schmetterlingsflechte« bezeichnet wird.

Ganz anders der Fall einer 63-Jährigen, die wegen unklarer Beschwerden in die Klinik kommt. Sie fühlt sich immer erschöpft, klagt über Gelenkschmerzen, und manchmal bereitet ihr das Atmen stechende Pein. Sie meidet seit der Pubertät die Sonne, denn überall, wo die Strahlung auf die Haut trifft, entsteht ein brennender, blasiger Ausschlag.

Als drittes Beispiel sei eine 20-Jährige angeführt. Eine Routineuntersuchung ergibt ungewöhnlich viele Eiweißstoffe (Proteine) im Urin – Anzeichen für eine Funktionsstörung der Nieren. Eine daraufhin entnommene Gewebeprobe zeigt entzündliche Veränderungen des Nierengewebes. Trotz der recht unterschiedlichen Symptome leiden alle drei Frauen an der gleichen Grundkrankheit: einem »systemischen Lupus erythematodes« (auch: »erythematosus«), oft abgekürzt als SLE. (»Systemisch« bedeutet, dass ganze Organsysteme oder sogar der gesamte Organismus betroffen sind. »Lupus« ist lateinisch für »Wolf« – die bei vielen Kranken typischen Hautveränderungen im Gesicht veranlassten die Wortassoziation. Griechisch »Erythema« bedeutet »Rötung«.)

IN KÜRZE

- Beim **systemischen Lupus erythematodes (SLE)** bildet das Immunsystem irrtümlich Antikörper, die verschiedenste körpereigene Gewebe angreifen: unter anderem Nieren, Haut und Gehirn.
- So komplex die Ursachen dieser **Autoimmunerkrankung** offenbar sind, dürften doch **Störungen von Signalübertragungen** in und zwischen Immunzellen eine Schlüsselrolle spielen. Davon scheinen zumindest zwei Sorten von Lymphozyten (einige der weißen Blutkörperchen) betroffen: die »B-Zellen«, die Antikörper produzieren; und die »T-Helferzellen«, welche die B-Zellen aktivieren.
- Gegenwärtig werden verschiedene Wirkstoffe erprobt, die spezifisch einzelne zelluläre Fehlfunktionen normalisieren sollen und dadurch die **Produktion abnormer Antikörper** unterdrücken würden.

Zu den Symptomen der Lupus-Krankheit gehören typische Hautveränderungen, insbesondere die so genannte Schmetterlingsröte im Gesicht.

Diese schwere, oft lebensbedrohliche Krankheit trifft überwiegend Frauen. Von 100 000 Menschen leiden im weltweiten Schnitt etwa 15 bis 60 daran, Schwarze öfter als Weiße. Es kommt vor, dass sich eine Lupus-Erkrankung auf die Haut beschränkt. Doch ein systemischer Lupus erythematodes kann praktisch jedes Organ, jeden Körperbereich in Mitleidenschaft ziehen. Nicht nur Haut und Gelenke, auch das Herz und die Lungen, die Blutgefäße, das Gehirn und, meist besonders fatal, die Nieren können ernstlich geschädigt werden.

Dass bei SLE das Immunsystem falsch funktioniert und »verkehrte« Antikörper bildet, ist schon länger bekannt. Eigentlich sollen Antikörper Eindringlinge, wie Bakterien, erkennen und bekämpfen helfen. Bei einer Autoimmunkrankheit aber richten sich manche gegen körpereigene Strukturen. Erwünschte Antikörper identifizieren Fremdmoleküle, so genannte Antigene oder genauer Fremdantigene. Diese Antikörper reagieren auf Oberflächenmoleküle von Krankheitserregern. Daran binden sie sich und schädigen den Eindringling entweder direkt, oder sie markieren ihn immunologisch, sodass er von anderen Komponenten des Immunsystems zerstört wird. ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



UNTEN RECHTS: MIT FRDL. GEN. DES AMERICAN COLLEGE OF RHEUMATOLOGY, KLINIK-BILDARCHIV;

▷ Bei Lupus-Patienten bildet der Organismus fälschlicherweise Antikörper, die körpereigene Moleküle für fremd halten. Das löst Immunattacken gegen eigene Gewebe und Strukturen aus. Mediziner kennen verschiedene solche Autoimmunkrankheiten. Der Diabetes mellitus Typ 1 gehört dazu, bei dem das Immunsystem die Insulin produzierenden Zellen der Bauchspeicheldrüse vernichtet. Auch die rheumatoide Arthritis und die multiple Sklerose sind Autoimmunkrankheiten, vielleicht auch die Schuppenflechte.

SLE hebt sich insofern ab, als das Immunsystem hierbei erstaunlich viele verschiedene körpereigene Moleküle heftig bekämpft. Die Palette reicht von Antikörpern gegen Zelloberflächenproteine bis zu welchen gegen Moleküle des Zellinneren, ja selbst gegen Komponenten des Zellkerns. Die Krankheit ist berüchtigt dafür, dass die Patienten Antikörper gegen eigene Erbsequenzen bilden. Im Laborversuch zerstören solche antinukleären Autoantikörper (Anti-DNA-Autoantikörper) eigene Erbmoleküle.

Über die Ursachen der vielgestaltigen Krankheit wussten die Mediziner bis vor Kurzem wenig Genaues. Allmählich zeichnet sich nun endlich ein klareres Bild der ihr zu Grunde liegenden molekularen Vorgänge ab, wozu etliche Forschungsansätze beitragen. Notwendigerweise geht es dabei auch um grundlegende, teils noch immer rätselhafte Fragen zur Immunität – darum, wie das Immunsystem Körpereigenes und Fremdes unterscheidet; wie es die normalerweise herrschende immunologische Toleranz gegen das Selbst, also gegenüber Autoantigenen, aufrechterhält; und wie es die Stärke von Immunantworten unter Kontrolle hält. Deswegen werden die Ergebnisse solcher Forschung auch zur Behandlung und Vorbeugung anderer Autoimmunerkrankungen nützen.

Diagnose von SLE: der Wolf im Schafspelz

Schätzungsweise 40000 Menschen leiden in Deutschland an einem systemischen Lupus erythematodes. Die Diagnose ist oft nicht einfach, denn noch existiert kein definitiver Nachweis speziell für diese Autoimmunkrankheit. Sogar Antikörper, die sich gegen Material aus eigenen Zellkernen richten und für eine Lupus-Erkrankung typisch sind, liefern keinen sicheren Beweis.

Üblicherweise gelten die hier genannten elf Kriterien als Anhaltspunkte. Sie wurden vom American College of Rheumatology aufgestellt. Der Lupus wird als entzündlich-rheumatische Autoimmunerkrankung eingeordnet und maskiert sich oft jahrelang als rheumatoide Arthritis. Bei drei zutreffenden Kriterien gilt die Diagnose als wahrscheinlich, bei vier als sicher. Mitunter genügen aber auch wenige sehr deutliche Symptome.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Fatale Nierenschäden gehören zu den besonders schwer wiegenden, gefürchteten Auswirkungen dieser Autoimmunerkrankung.

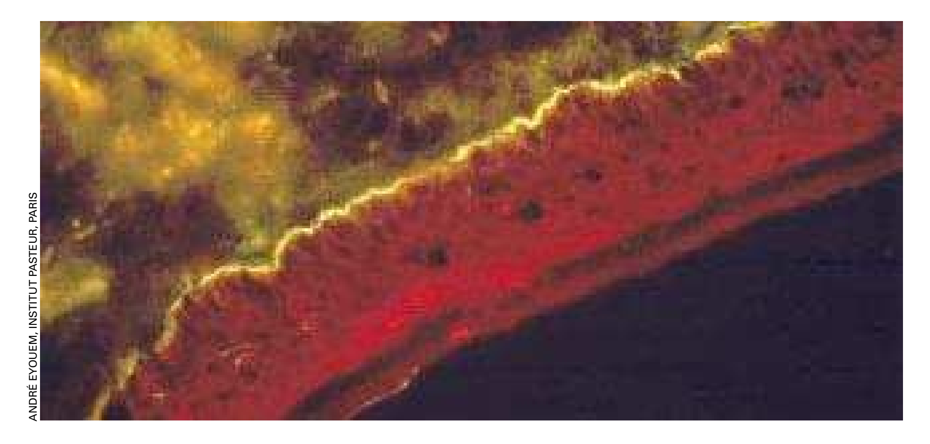
Diagnosekriterien
Schmetterlingserythem im Gesicht
diskoides Erythem (leuchtend rote, erhabene Hautläsionen)
hohe Lichtempfindlichkeit mit Hautausschlägen
Geschwüre an Mund- und Nasenschleimhaut (typischerweise schmerzlos)
Arthritis in mindestens zwei Gelenken (Entzündungen führen nicht zu Knorpelschäden)
Entzündungen von Brustfell, Rippenfell oder Herzbeutel
Nierenerkrankung mit typischem Urinbefund (zum Beispiel Kapillarentzündung)
neurologische Erkrankung (unerklärbare Psychose oder Krampfanfälle)
gestörtes Blutbild, sofern nicht auf Medikamente zurückzuführen (zu wenig rote oder weiße Blutkörperchen oder Blutplättchen)
antinukleäre (gegen Kern-DNA gerichtete) Antikörper, sofern nicht auf Medikamente zurückzuführen
Antikörper gegen doppelsträngige DNA oder Phospholipide; falsch positiver Befund bei Syphilis-Test

Entzündungen ohne äußeren Anlass

Eines zumindest steht schon länger fest: Die lupustypischen Autoantikörper verursachen die Gewebeschäden nicht nur auf eine Weise. Stößt solch ein Antikörper auf »sein« spezifisches körpereigenes Antigen, dann bilden die beiden einen so genannten Immunkomplex. Findet die Begegnung im Blut statt, kann sich dieser Komplex in ganz verschiedenen Geweben ablagern. Findet sie in einem Gewebe statt, bleibt der Immunkomplex dort. In beiden Fällen schafft das Unbill.

Zum einen rufen diese Immunkomplexe in der Regel so genanntes Komplement auf den Plan, ein Aggregat aus Immunmolekülen, das Gewebe direkt zerstört. Außerdem verursachen sie – selbstständig oder im Verbund mit Komplement – Entzündungsreaktionen, an denen sich weiße Blutzellen beteiligen. Eine Entzündung dient an sich der Abwehr etwa von Krankheitserregern, doch kann sie unter Umständen auch gesundes Gewebe schädigen, sofern sie fehlgeleitet ist oder zu lange anhält.

Überdies kommt es vor, dass sich im entzündeten Gewebe Zellen übermäßig vermehren, was dessen Funktion stören kann. Nehmen wir die Nieren: Lagern sich in den Urin bildenden Kapillarfiltern – den knötchenförmigen Glomeruli – Immunkomplexe in Mengen ab, löst das eine Glomerulonephritis aus, eine lokale Entzündungsreaktion mit oft dauer-



Die leuchtend gelbe Linie zeigt Antikörper, die sich gegen Gewebe an der Grenze zwischen Ober- und Lederhaut richten. Hier wurde das Hautpräparat eines Meerschweinchens mit Blutserum eines Lupus-Patienten versetzt.

haftem Nierenschaden als Folge. Sogar ohne den Umweg über eine Entzündung können manche der Autoantikörper Zellen direkt schaden. Wie Laborversuche ergaben, dringen sie auch in Zellen ein und blockieren dort dann essenzielle Funktionen.

Obwohl wir dies alles wissen, bleibt doch die große Frage, was den Immunangriffen vorausgeht. Wieso treten sie überhaupt auf? Zumindest bei einem Teil der Patienten scheint hierbei auch eine erbliche Veranlagung mitzuwirken, denn etwa jeder zehnte Kranke hat nahe Verwandte, die ebenfalls an einem Lupus leiden oder litten. Befunde an eineiigen Zwillingen sprechen ebenfalls dafür. Die Suche nach Genfehlern ist noch im Gange, wobei die Forscher auch bei der Überzahl von SLE-Patienten ohne offensichtliche familiäre Disposition nach defekten Erbsequenzen fahnden.

Erbfaktoren nicht allein schuldig

Bei Mäusen mit einer entsprechenden Veranlagung identifizierten Genetiker über 30 größere Abschnitte auf den Chromosomen, die mit der Entstehung einer Lupus-Erkrankung beziehungsweise mit einer Resistenz gegen die Krankheit zu tun haben könnten. So trägt einer der Abschnitte Gene, die dabei mitwirken, Autoantikörper gegen Komponenten des Zellkerns herzustellen. Eine andere der Chromosomenregionen beeinflusst den Schweregrad der Glomerulonephritis.

Beim Menschen könnte der genetische Hintergrund sogar noch vertrackter sein. DNA-Untersuchungen von Familien mit mehreren Betroffenen ergaben bisher 48 verdächtige Chromosomenregionen. Besonders sechs davon, auf fünf verschiedene Chromosomen verteilt, scheinen einen starken Einfluss auszuüben. Als Nächstes gilt es, dort die jeweils verantwortlichen Gene zu identifizieren. Aus diesen Befunden darf man wohl schließen, dass die Anfälligkeit für SLE auf zahlreiche, ganz verschiedene Erbanlagen zurückgehen kann. Ihr Beitrag im Einzelfall dürfte jedoch schwer zu ermitteln sein, denn möglicherweise sind bei einer erblichen Veranlagung jeweils andere Genkombinationen schuld. Ein Erbfaktor allein gibt mit Sicherheit kaum einmal den Ausschlag, falls das überhaupt vorkommt. Denn sonst müssten wesentlich mehr Kinder von kranken Eltern ebenfalls erkranken, und nicht lediglich fünf Prozent. Auch tritt das Autoimmunleiden eher selten in mehr als zwei Generationen auf.

Vor diesem Hintergrund muss man auch Umweltfaktoren verdächtigen. Offenkundig ist die Bedeutung von Sonnenstrahlung: Ungefähr jeder zweite Betroffene reagiert auf UV-Strahlung überempfindlich. Viele dieser Menschen bekommen schon einen Ausschlag, wenn sie sich im Sommer mittags zehn Minuten in der Sonne aufhalten. Eine längere Exposition kann sogar den nächsten Krankheitsschub auslösen – wieso, ist allerdings nicht recht klar. Vielleicht spielt eine Rolle, dass sich unter UV-Strahlung das Erbmaterial in den Hautzellen verändert, wie Mediziner vermuten. Die defekten Moleküle, so die Überlegung, stuft das Immunsystem als körperfremd ein: Es hält sie für von außen kommende Antigene, die bekämpft werden müssen. Da UV-Strahlung gleichzeitig die Zellmembranen brüchig macht, könne es geschehen, dass die Hautzellen zerfallen und diese »Antigene« freisetzen – was dann eine Autoimmunreaktion provoziert.

Des Weiteren gehören manche Medikamente zu den Symptome auslösenden Faktoren, etwa das Blutdruckmittel Hydralazin oder das Herzmedikament Procainamid. Allerdings gehen die Erscheinungen gewöhnlich zurück, wenn das Mittel wieder abgesetzt wird. Auch eine Infektion, sie muss nicht einmal schwer sein, kann die Krankheit hervorrufen oder aufflackern lassen. Zu den hierbei verdächtigten Erregern gehört das Epstein-Barr-Virus, welches das Pfeiffer'sche Drüsenfieber verursacht. Einige Impfstoffe können ebenfalls einen Schub auslösen. Auf der anderen Seite haben Mediziner bisher einen Krankheitserreger für Lupus nicht nachgewiesen. Dagegen gibt es Anzeichen dafür, dass bestimmte Substanzen oder Lebensumstände das Leiden anschieben oder vorantreiben können, so Nahrungsmittel mit hohem Gehalt an gesättigten Fettsäuren, Umweltschadstoffe und Zigarettenrauch, möglicherweise auch extreme körperliche und psychische Belastungen.

Zellselbstmord unter Verdacht

Abweichungen auf zellulärer und molekularer Ebene, die eine Autoimmunreaktion auslösen oder unterhalten könnten, werden nun intensiv erforscht. Ob die in dem Zusammenhang bei Erkrankten bisher aufgedeckten Besonderheiten eher genetische oder andere Ursachen haben, ist zwar noch offen. Doch auch hier ist anzunehmen, dass meist Vielerlei zusammenspielt.

Recht eindrucksvoll sind Veränderungen im Zusammenhang mit dem regulären Zellselbstmord, fachlich Apoptose genannt. An sich ist der programmierte Selbstmord von Zellen ein normaler, unspektakulärer Vorgang im Körper, der dazu dient, unter anderem zu alte, überflüssig gewordene oder entartete Zellen loszuwerden. Die Zellen stellen dazu Enzyme her, mit denen sie sich von innen heraus selbst zerstören, welche also etwa wichtige Proteine und die Chromosomen im Zellkern zerlegen. Bei Lupus-Patienten unterliegen manche Zelltypen dem Zellselbstmord allerdings häufiger als normal. Das gilt insbesondere für die B- und T-Zellen (-Lymphozyten) des Immunsystems, die bei Immunattacken besondere Aufgaben wahrnehmen. ▷

Normalerweise entsorgt der Organismus durch das Selbstmordprogramm vernichtete Zellen schnell und effektiv. Doch beim Lupus erythematodes stimmt hiermit irgendetwas nicht. Weil hierbei erstens ungewöhnlich viele Zellüberreste anfallen und diese zweitens nicht gut genug entsorgt werden, könnte eine dritte Voraussetzung zu einer Autoimmunisierung beitragen: Angenommen, die Selbstmordzellen enthalten viel abnormes Material, so käme das nun in größerer Menge frei, würde aber nicht unverzüglich beseitigt und könnte sich sogar anhäufen. Das Immunsystem stört sich daran als etwas Fremdem, potenziell Gefährlichem. Es bildet dagegen Antikörper – und schon baut sich eine Autoimmunität auf (siehe Kasten S. 82).

Falsch programmierte B-Zellen

Fatalerweise enthalten die Selbstmordzellen von Lupus-Kranken wohl tatsächlich oft abnormes Material. Besonders scheint das für die Chromosomenbruchstücke zu gelten. Untersucht man Immunkomplexe aus dem Blut der Patienten, so weist die DNA zu wenig so genannte Methylgruppen auf. Die sind aber wichtig, um Genaktivitäten zu regulieren. Es gibt gute Gründe zu vermuten, dass dieses Manko zur Entstehung von Autoimmunität beitragen kann.

Reife B-Zellen werden zu Antikörperfabriken. Im Labor kann falsch methylierte DNA diese und etliche andere Immunzellen zur Reifung stimulieren. Möglicherweise hält der Organismus die falsch methylierten DNA-Bereiche für Anzeichen einer Infektion, gegen die er vorgehen muss. Übrigens verursachen manche Medikamente, die Lupus-Symptome auslösen können, bei Mäusen eine Untermethylierung von DNA in T-Zellen. Bei den Nagern entsteht dann eine Eigenimmunität gegen diese Zellen.

Insgesamt sprechen die Befunde also dafür, dass Selbstmordzellen ein Reservoir für Antigene abgeben könnten, die unter manchen Umständen eine Autoimmunität regelrecht herausfordern. Bei Mäusen mit normaler Immunfunktion lässt sich die Herstellung von Antikörpern gegen körpereigene Moleküle anregen, wenn man den Tieren größere Mengen von bestrahlten Selbstmordzellen ins Blut spritzt. Wenn der Organismus also selbstzerstörerische Immunkomplexe bildet, könnten daran teilweise eigene Moleküle schuld sein, die ihn fremd und somit bedrohlich anmuten. Diese scheinbaren Fremdlinge muss er einfach attackieren.

Nur ist das offenbar nicht die ganze Erklärung. Andere Studien ergaben, dass die B-Zellen von Lupus-Patienten ohnehin nicht korrekt funktionieren. Sie tun, was B-Zellen keinesfalls dürfen: Sie bilden Antikörper gegen völlig einwandfreie körpereigene Moleküle. Damit unterlaufen sie die immunologische Selbsttoleranz, diese wichtige Eigenschaft eines funktionierenden Immunsystems.

Die Ursache der Fehlsteuerung liegt vermutlich weit gehend bei den B-Zellen selbst. Und zwar scheinen Signale im Zellinnern nicht völlig korrekt zu funktionieren. Eine B-Zelle darf erst und nur dann zu einer Antikörperfabrik – einer so genannten Plasmazelle – heranreifen, wenn ihre Oberflächenrezeptoren mit einem körperfremden Antigen Kontakt herstellen, das heißt sich daran binden. Erwischt die B-Zelle aber eine körpereigene Struktur, bringt sie sich normalerweise entweder um, sie verfällt in einen immunologisch inaktiven Zustand oder sie korrigiert ihre Rezeptoren so lange, bis diese das körpereigene Molekül nicht mehr erkennen.

Großenteils hängt das korrekte Verhalten einer B-Zelle davon ab, dass sie Signale im Zellinnern ordnungsgemäß weiterleitet – und zwar Signale, die sie von außen aufnimmt. Wie Untersuchungen an Mäusen zeigten, können be-

B-Zellen fehlgeleitet

Normalerweise reagieren B-Lymphozyten (B-Zellen) nur auf körperfremde Antigene, etwa von Bakterien. Bei Lupus-Patienten bilden manche fälschlich Antikörper gegen körpereigene Komponenten.

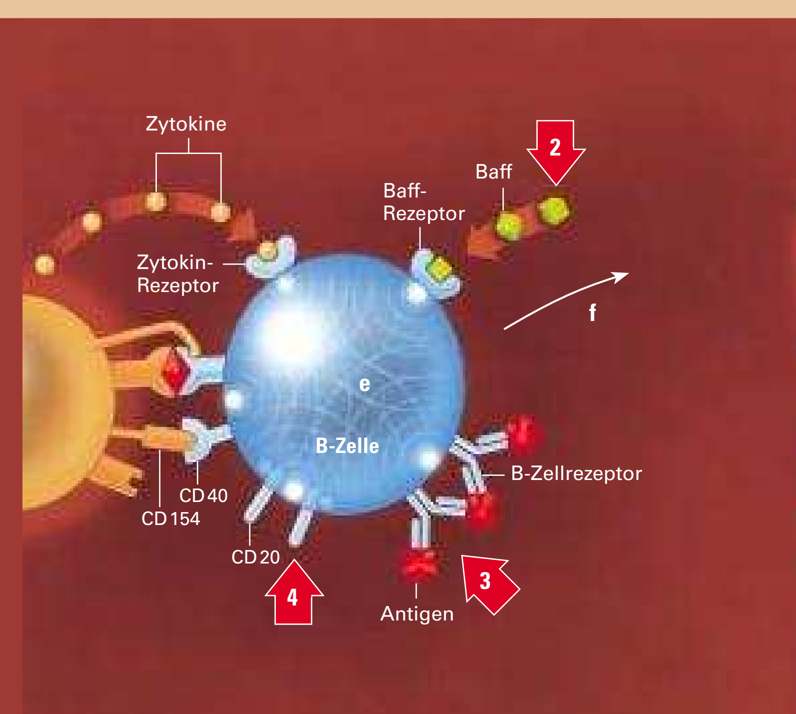
a Eine antigenpräsentierende Zelle nimmt ein potenzielles Antigen auf und zerlegt es.

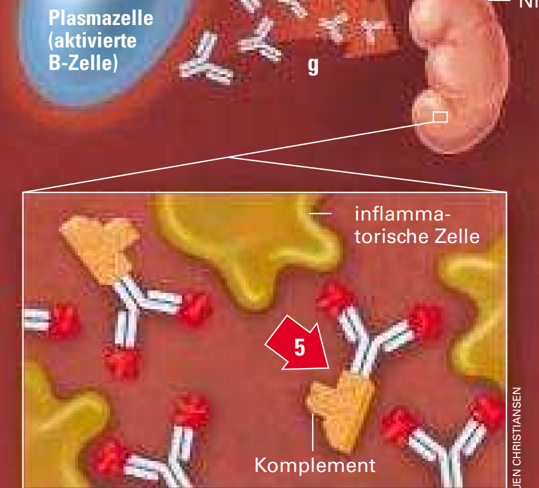
b Fragmente des Antigens präsentiert sie einer T-Helferzelle, die in der Folge aktiviert wird.

c Die aktivierte T-Zelle vermehrt sich.

d Die T-Zelle verändert sich so, dass sie ihrerseits B-Zellen aktivieren kann; unter anderem schüttet sie dazu stimulierende Zytokine aus.

aktivierte T-Zellen
Aktivierungssignal
T-Helferzelle
Bakterium oder Zelltrümmer
CD28
B7
Antigenkomplex
CD4
T-Zellrezeptor
MHC II
aufgenommenes Material wird in Fragmente zerlegt
antigenpräsentierende Zelle





e Die Aktivierung der B-Zelle erfordert verschiedene Signale; so ist nötig, dass die T-Zelle den gleichen Antigen-MHC-Komplex vorfindet wie anfangs an der antigenpräsentierenden Zelle; ferner ist die Stimulation des Baff-Rezeptors erforderlich; auch muss das entsprechende Antigen an den B-Zellrezeptor binden.

f Die aktivierte B-Zelle reift zu einer Plasmazelle heran, die Antikörper produziert.

g Diese Antikörper erkennen das ursprüngliche Antigen; sie helfen Zellen und Gewebe zu zerstören, die es aufweisen, indem sie destruktive und Entzündungen erzeugende Immunkomponenten dorthin lenken.

Es gibt verschiedene neuere Ansätze, gezielt Prozesse zu unterbrechen, die letztlich diese Antikörper hervorbringen. Die roten Pfeile markieren Angriffspunkte der unten aufgezählten Entwicklungen.

Beispiele für neue Therapieentwicklungen

	Prinzip	unter Erprobung
1	Blockade der Bindung von B7 an CD28 **Ziel:** Hemmung der T-Zell-Aktivierung	beim Forschungskonsortium Immune Tolerance Network und den amerikanischen National Institutes of Health: B7-Blocker RG2077
2	Blockade der Bindung von Baff an seinen Rezeptor **Ziel:** BAFF (auch Blys genannt) hindern, das Überleben von B-Zellen und die Antikörperproduktion zu stimulieren	bei Human Genome Sciences (Rockville, Maryland): LymphoStat-B; bei ZymoGenetics (Seattle) und Serono S.A. (Genf): TACI-Ig
3	Blockade von B-Zell-Rezeptoren und von Antikörpern gegen körpereigene DNA **Ziel:** Hemmung von Synthese und Aktivität dieser Antikörper	bei La Jolla Pharmaceuticals (San Diego): Abetimus-Natrium (Riquent), das gegen Nierenschäden helfen könnte
4	Antikörper gegen CD20. **Ziel:** Ausmerzen von B-Zellen	bei Genentech (South San Francisco, Kalifornien) und Biogen Idec (Cambridge, Massachusetts): Rituximab (Rituxan); zur Behandlung von B-Zell-Lymphomen schon zugelassen
5	Hemmung der Komplementaktivität **Ziel:** entsprechende Gewebezerstörung verhindern	bei Alexion Pharmaceuticals (Cheshire, Connecticut): Studie an Mäusen mit einem Komplement-C5-Inhibitor

reits winzige Ungleichmäßigkeiten auf diesen Signalwegen dafür prädisponieren, Autoantikörper zu bilden. Von einigen daran beteiligten Molekülen auf oder in den B-Zellen haben Forscher schon den Verdacht, dass sie bei Lupus-Patienten womöglich in falscher Menge vorhanden sind.

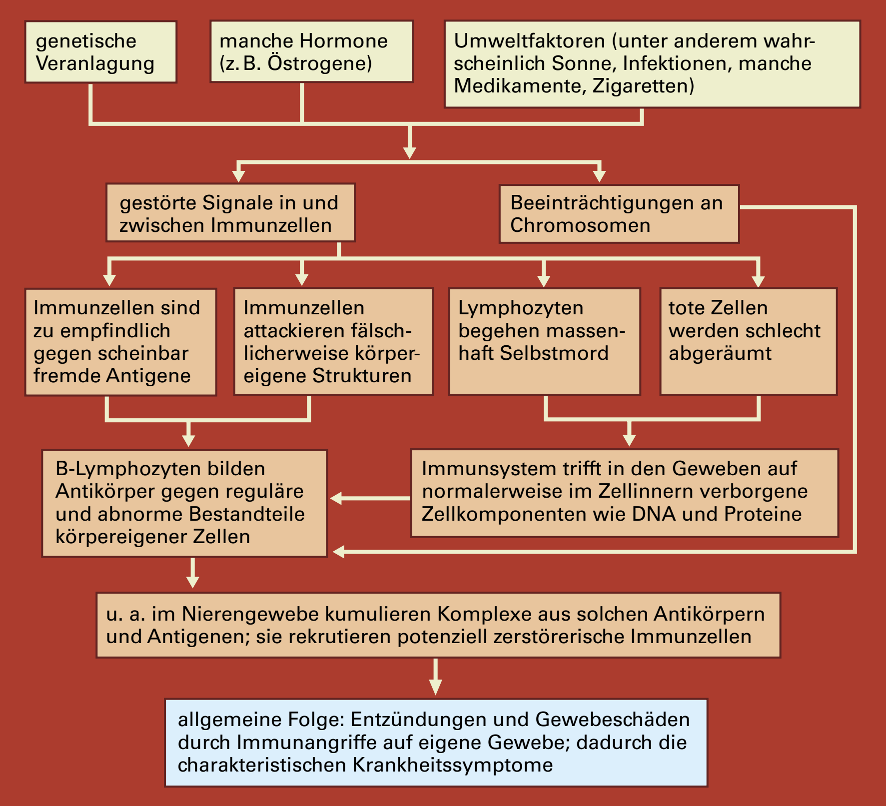
Trotzdem sind die B-Zellen an den Autoantikörpern wohl nicht allein schuld. Um zu Antikörperfabriken zu werden, brauchen sie auch anregende Signale von so genannten T-Helferzellen (siehe Kasten S. 80/81). Und die Helferzellen von Lupus-Kranken funktionieren ebenfalls nicht einwandfrei – es handelt sich um ähnlich geartete Defekte in den Signalwegen wie bei den B-Zellen. Dadurch übermitteln diese T-Zellen den B-Zellen falsche Botschaften.

Wer die Ursachen des systemischen Lupus erythematodes aufzeigen will, muss auch unbedingt erklären, wieso neun von zehn SLE-Patienten Frauen sind. Sie erkranken zudem tendenziell in jüngeren Jahren als Männer – überwiegend sind sie im gebärfähigen Alter. Die besondere Anfälligkeit des weiblichen Geschlechts, die übrigens auch für einige andere Autoimmunleiden gilt, mag zum Teil dadurch bedingt sein, dass Frauen immunologisch stärker reagieren. Sie neigen dazu, mehr Antikörper und mehr weiße Blutzellen als Männer zu bilden. Wohl deswegen sind sie gegen Infektionen etwas widerstandsfähiger. Hierzu könnten auch Befunde von Mäusen passen: Weibchen stoßen implantiertes Fremdgewebe rascher ab als Männchen.

Dass sich Geschlechtshormone anscheinend auf die Reaktionsbereitschaft der Immunabwehr auswirken, kommt vielleicht nicht so überraschend. Wie Forscher an Versuchstieren beobachteten, verschlimmert sich eine Lupus-Erkrankung bei Östrogengaben, und der Zustand verbessert sich, wenn die Tiere Androgene erhalten. Für die weiblichen Hormone gäbe es verschiedene Wege, die Immunantwort zu stärken. Zum einen stimulieren Östrogene die Sekretion von Prolaktin und Wachstumshormon, die beide bei der Vermehrung von weißen Blutzellen mitwirken. Zum anderen tragen die weißen Blutzellen auch selbst Rezeptoren für Östrogene. Können die weiblichen Sexualhormone auf solche Weise in die Reifung von B-Zellen eingreifen und eventuell dabei sogar falsche Weichen stellen?

Wie Lupus entsteht

Die Hintergründe für die Entstehung der Krankheit sind einigermaßen bekannt. Diese Zusammenhänge sind hier angeführt. Manche Einzelheiten müssen noch genauer erforscht werden – so die Rolle von Hormonen und Umwelteinflüssen bei Immunattacken auf Gewebe.



Komplexe Signalkaskaden

Natürlich würden die Forscher gern all die verschiedenen bisher entdeckten Fassetten zu SLE zu einem Bild zusammenbringen. Wie aber könnten genetische Dispositionen, Umweltfaktoren und Immunmechanismen ineinander greifen? Womit beginnt alles? Und welches sind dann die bedeutendsten Einflüsse auf den weiteren Verlauf? Wichtig zu wissen wäre auch, inwieweit im individuellen Fall unterschiedliche Prozesse ablaufen. Augenblicklich fügen sich zumindest schon Teilaspekte zu einem Szenario zusammen, das abbilden könnte, wie sich ein systemischer Lupus erythematodes typischerweise entwickelt.

Die Grundvorstellung ist, dass genetische Veranlagung und Umweltfaktoren wohl beide zugleich für die Fehlfunktion im Immunsystem verantwortlich sind. Dabei handelt es sich genauer gesagt um Signalstörungen in Lymphozyten (den B- und den T-Zellen) und möglicherweise auch in anderen Immunzellen – darunter auch jenen, deren Aufgabe es ist, tote Zellen und Zellreste abzuräumen. Die Signalfehler wiederum beeinträchtigen die immunologische Selbsttoleranz, verkürzen die Lebensdauer von weißen Blutkörperchen und stören die Beseitigung der Zellbestandteile nach einem Zellselbstmord. Anders gesagt: Die Vernichtung von Molekülen aus dem Zellinnern, von Selbstantigenen also, funktioniert nicht normal. Und die Massen an merkwürdigen, weil schadhaften Molekülen verleiten das ohnehin fragile Immunsystem dann zu den unerwünschten Attacken auf körpereigene Strukturen.

Wie sieht es mit medizinischen Möglichkeiten aus? Bisherige Medikamente, die den Zustand der Patienten verbessern, dämpfen das Immunsystem leider unspezifisch. Das heißt, sie schwächen auch die Abwehrkräfte gegen Krankheitserreger. Kortikosteroide etwa mindern Entzündungsreaktionen, erhöhen aber die Infektanfälligkeit.

▷ Deswegen gilt es Wirkstoffe zu entwickeln, die hauptsächlich Autoimmunattacken unterbinden, ohne die Abwehrkräfte sonst allzu sehr zu schwächen. Um genauer zu verstehen, wo diese Forschungen ansetzen, muss man sich klarmachen, wie T-Helferzellen normalerweise B-Zellen dazu bringen, sich in Antikörperfabriken zu verwandeln (siehe Kasten S. 80/81).

Und zwar müssen zunächst die T-Helferzellen selbst aktiviert werden. Das geschieht mit Hilfe von professionellen antigenpräsentierenden Zellen (Immunzellen wie zum Beispiel Makrophagen und dendritische Zellen). Diese Profis schlucken Bakterien, tote Zellen und Zelltrümmer, zerlegen sie und präsentieren Molekülfragmente davon an ihrer Oberfläche, die sie in ein spezielles Trägermolekül packen (fachlich spricht man vom MHC-II-Komplex). Bindet sich hieran ein Rezeptor auf einer T-Helferzelle, so dringt ein spezifisches Signal in die Helferzelle. Sie braucht aber noch ein zweites, antigenunabhängiges Signal. Das erhält sie, wenn sich zwei weitere Partner auf den beiden Zellen finden (CD28 und B7 genannt). Nun schaltet die Helferzelle in den aktiven Zustand um: Sie exponiert und verschickt nun Moleküle, mit denen sie B-Zellen aktiviert.

Erprobung von zielgenauen Medikamenten

Auch B-Zellen präsentieren von aufgenommenem Material Fragmente als MHC-II-Komplex – vornehmlich Stücke von Antigenen, die sie erwischt haben. Bindet nun an einen solchen Komplex eine aktivierte T-Helferzelle und tauschen die beiden Zellen zugleich weitere Signale aus, dann exponiert die B-Zelle Rezeptoren für Zytokine: kleine Proteine, die von den aktivierten T-Zellen freigesetzt werden. Die Zytokine wiederum regen die B-Zellen an, sich zu vermehren und zu Plasmazellen heranzureifen. Diese Plasmazellen endlich bilden spezifische Antikörper, die sich genau gegen das zuvor von B- und T-Zelle gemeinsam erkannte Antigen richten.

Ist die Gefahr vorüber, wird die geschilderte Immunreaktion normalerweise sofort abgestellt. Zu dem Zweck beginnt die T-Zelle nach ihrer Aktivierung ein Protein (CTLA-4) zu exponieren, welches ein so starkes Bindungsvermögen an das B7 der antigenpräsentierenden Zelle aufweist, dass es jene Moleküle fast durchweg erfasst und somit weitere Aktivierungen von T- und dadurch B-Zellen ausbremst. Dieser Mechanismus begrenzt gewöhnlich die Antikörperbildung.

Auf diesen Schalter zielt einer der neuen Ansätze einer spezifischen Lupus-Therapie. Im Mäusemodell verhinderte ein dazu getesteter Wirkstoff ein weiteres Fortschreiten von Nierenschäden, und die Tiere überlebten länger. Nach ersten klinischen Tests an Patienten mit Schuppenflechte ist die Substanz für den Menschen verträglich. Jetzt wird sie an Lupus-Kranken erprobt.

Bei einem anderen Ansatz möchten Forscher den Signalaustausch zwischen aktivierter T-Zelle und B-Zelle unterbinden, indem sie mit speziell dafür gezüchteten Antikörpern das Molekül CD154 von T-Helferzellen blockieren (im Kasten auf S. 80/81 nicht dargestellt). Dieses Molekül nämlich erzeugen die Helferzellen von Lupus-Patienten im Übermaß. Bei Mäusen gelang es auf die Weise bereits, eine B-Zell-Aktivierung zu verhindern. Erste Studien am Menschen mit verschiedenen Antikörperversionen brachten allerdings recht gemischte Ergebnisse, sodass nicht abzusehen ist, ob sich diese Vorgehensweise bewähren wird. Im einen Fall sank zwar die Autoimmunität, und es besserten sich auch einige der Begleitsymptome. Doch als Nebeneffekt stieg die Thrombosegefahr in nicht akzeptierbarem Maße. Mit einer anderen Version erhöhte sich zwar nicht das Thromboserisiko, doch sie half auch nicht besonders gut gegen die Lupus-Symptome.

Eine weitere Strategie richtet sich gegen das Zytokin »Baff«, beziehungsweise gegen seine Erkennungsmoleküle von B-Zellen. Denn von Immunzellen abgegebene Faktoren wie Baff verlängern die Überlebenszeit von B-Zellen. Nicht nur beim Lupus, auch bei anderen Autoimmunerkrankungen fallen diese Faktoren auf. Gentechnisch veränderte Mäuse, die zu viel Baff oder zu viel von einem seiner drei Rezeptoren auf B-Zellen bilden, zeigen Symptome von Autoimmunleiden. Das Zytokin scheint sowohl im Mäusemodell für Lupus als auch bei lupuskranken Menschen in abnormer Menge hergestellt zu werden.

Es gibt eine Reihe weiterer viel versprechender Ansätze für Eingriffe an speziellen zellulären Vorgängen, die hier nicht alle beschrieben werden können (siehe auch Tafel auf S. 81 unten). So arbeiten Forscher unter anderem daran, zur Therapie von Autoimmunerkrankungen die Zahl der B-Zellen gezielt zu vermindern. Der Wirkstoff Rituximab eliminiert B-Zellen aus dem Blut, noch bevor sie Antikörper ausschütten. Erste klinische Studien mit Lupus-Patienten wecken Hoffnungen.

Hilfe durch Gentechnik?

Vielleicht gelingt es sogar, die verheerenden Autoantikörper abzufangen, die sich gegen körpereigene DNA richten, oder deren Herstellung direkt zu unterbinden. Um sie wegzufischen, könnten sich etwa komplexe DNA-ähnliche Attrappenmoleküle eignen. So gut das klingt – diese Idee umzusetzen wird nicht leicht sein.

Was wiederum die Zytokine betrifft, so könnten sich manche von ihnen wie auch einige andere Proteine durchaus als therapeutisch hilfreich erweisen. Allerdings muss man mit einem schnellen Abbau solcher Proteine im Blut rechnen. Die Forscher erwägen darum Gentherapien, sodass Zellen im Körper stets Nachschub liefern. In der Diskussion sind auch noch andere gentechnische therapeutische Eingriffe, von denen sich allerdings jetzt noch nicht sagen lässt, ob sie durchführbar und sinnvoll sind.

Die Forscher gehen bei Lupus erythematodes an zwei Fronten vor. Die einen suchen nach besseren, zielgenaueren Therapien, die anderen fahnden nach den Ursachen des verheerenden Leidens. Hier versprechen sie sich viel von den Studien zur Signalübertragung in und zwischen den Immunzellen und deren Störungen. Mit einem genaueren Verständnis der Ursachen für fehlerhafte Signale hoffen sie den roten Wolf schließlich doch in Ketten zu legen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Moncef Zouali ist Forschungsdirektor bei INSERM in Paris, dem französischen Nationalen Institut für Gesundheit und medizinische Forschung. Er ist Immunologe und Molekularbiologe.

Molecular autoimmunity. Von Moncef Zouali (Hg.). Springer, 2005

B Lymphocyte signaling pathways in systemic autoimmunity: Implications for pathogenesis and treatment. Von Moncef Zouali und Gabriella Sarmay in: Arthritis & Rheumatism, Bd. 50, Heft 9, S. 2730, September 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Physik als Event: der PhysikClub in Kassel

Eine etwas außergewöhnliche Arbeitsgemeinschaft hat sich in dreieinhalb Jahren zu einer veritablen Forschungseinrichtung für Schüler gemausert.

Von Klaus-Peter Haupt

Als ich Anfang 2002 ein neues Projekt namens »PhysikClub« in unserer Schule vorstellte, erntete ich bei der Zielgruppe zunächst große Heiterkeit. Zusätzlicher Physikunterricht? Freiwillig? Am Freitagnachmittag? Kaum ein Schüler konnte sich vorstellen, dass dieses Angebot überhaupt auf Gegenliebe stoßen würde, schon gar nicht bei ihm selbst; die wenigen Andersdenkenden zogen es vor, ihr Interesse heimlich zu bekunden.

Diese Skepsis hat sich gelegt, nachdem der PhysikClub die Ergebnisse seiner Arbeit öffentlichkeitswirksam präsentieren konnte. Inzwischen floriert der Club. Jeden Freitag treffen sich in der Albert-Schweitzer-Schule bis zu 50 und mehr Schülerinnen und Schüler, davon die Hälfte aus anderen Kasseler und nordhessischen Schulen, und für die Auswärtigen erweist sich der durch organisatorische Gründe erzwungene Termin sogar als günstig: Da kann man für die »Freitagsvorträge«, die ich seit Langem mit Schule und Astronomieverein organisiere, gleich dableiben, eine Möglichkeit, von der nicht wenige Teilnehmer Gebrauch machen.

Anfangs Chaos – aber nur als Thema

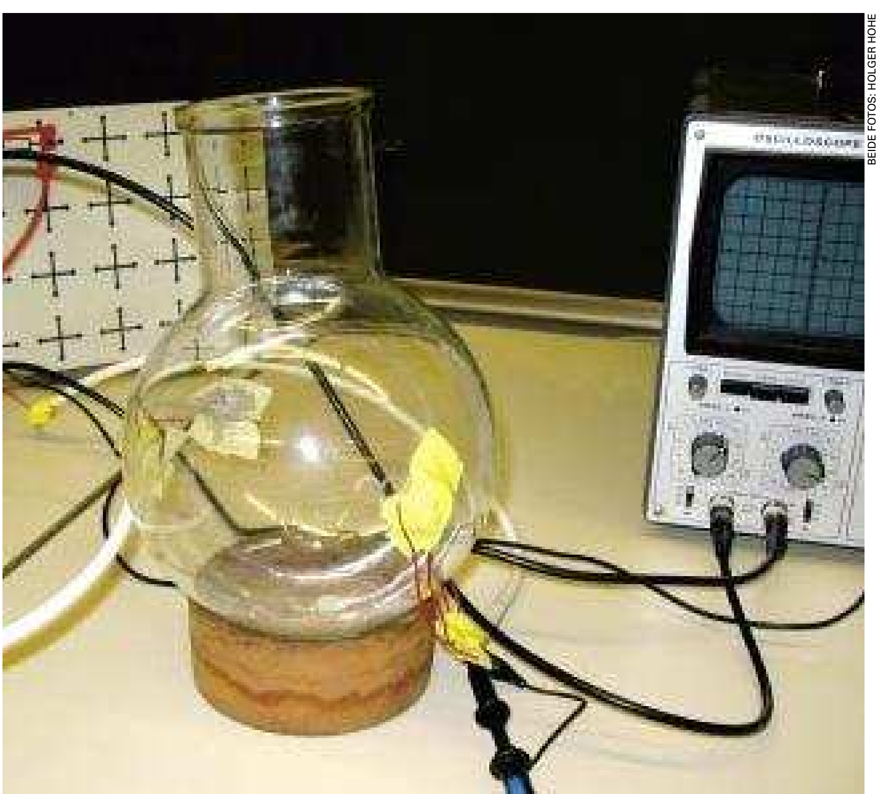
Das Projekt, das zu einem vom Staatlichen Schulamt Kassel initiierten Förderprojekt für besonders begabte und interessierte Schülerinnen und Schüler gehört, ging von Anfang an in seiner Zielrichtung weit über eine übliche Physik-Arbeitsgemeinschaft hinaus. Drei Aspekte standen für mich im Vordergrund:

▶ Ich wollte die schon seit langer Zeit von mir bevorzugte konstruktivistische Unterrichtsmethode anwenden, in der die Lerner sich ihr Wissen mit einer Vielfalt von Methoden eigenständig konstruieren.

▶ Inhaltlich wollte ich anstelle der Schulphysik Aspekte der aktuellen Forschung in den Vordergrund stellen.

▶ Drittens wollte ich es wagen, mit einer alters- und leistungsmäßig sehr heterogenen Gruppe zu arbeiten. Teilnehmer ab 14 Jahren bis zum Abitur waren willkommen, besondere Begabung oder gute Leistungen waren nicht Voraussetzung; schlichtes Interesse genügte. Zudem brachten die Teilnehmer schon deshalb unterschiedliche Voraussetzungen mit, weil sie von verschiedenen Schulen kamen. Diese in mehrfacher Hinsicht bunte Mischung hat von Anfang an die Arbeit nicht beeinträchtigt oder gar behindert, sondern war Quelle einer großen gegenseitigen Bereicherung.





BEIDE FOTOS: HOLGER HOHE

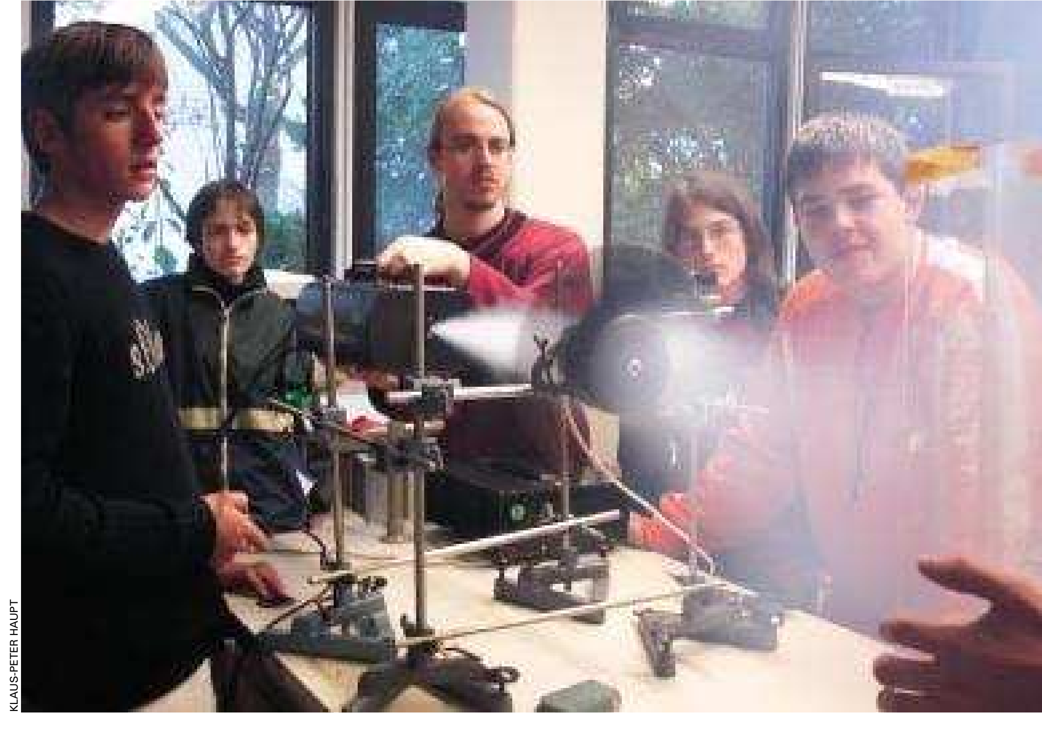
Als Thema des ersten Kurses hatte ich die Chaosphysik gewählt, aus mehreren Gründen: Sie bietet genügend Anknüpfungspunkte an aktuelle Forschung; es gibt schöne Experimente und anspruchsvolle Untersuchungen, die mit Schülermitteln durchführbar sind; und es ist für jede Altersgruppe etwas dabei.

Diesen Kurs habe ich noch mit großer Sorgfalt bis in die Einzelheiten selbst strukturiert: Einführung in das Thema mit den klassischen pädagogischen Mitteln »fragend-entwickelndes Unterrichtsgespräch« und »Lehrerreferat«, dazu ein Film zum Thema. Außerdem erarbeitete ich eine Liste mit zwanzig Projektvorschlägen, die ich schriftlich und mündlich mit zusätzlicher Information anreicherte. Aus dieser Liste suchten sich die Teilnehmer acht Projekte heraus, wobei abermals sehr heterogene Gruppen zu Stande kamen. Zu den ausgewählten Teilprojekten gab es noch zusätzliche Literatur zur weiteren Einarbeitung.

Nach dem gängigen pädagogischen Grundverständnis sollen sich die Schüler zwar Gedanken über das machen, was ihnen beigebracht wird, aber nicht unbedingt darüber, wie es ihnen beigebracht wird. Der Lehrer darf »zaubern«, aber es erscheint eher störend, wenn er seine Zaubertricks offen legt. Nach dem konstruktivistischen Modell soll jedoch der Lerner seinen Lernprozess weit gehend selbst gestalten, wozu er Anleitung benötigt. Daher bekamen die Schüler von mir auch Texte zur Lernmethode (»metakognitive Texte«) zu lesen, und zwar geeignet ausgewählte Abschnitte aus Originalveröffentlichungen in Physikdidaktik und Wissenschaftstheorie. Konkret ging es um die Erarbeitung von Wissen aus der Literatur sowie um Organisation und Ablauf von Forschungsprozessen, teils in englischer Sprache.

In den folgenden Monaten beschäftigten sich die Schüler mit ihrem Projekt. Nur an zwei eingestreuten Informationsnachmittagen habe ich – mit klassischen Unterrichtsformen – die Themen »Dimensionsbegriff und Fraktale« sowie »Rückkopplungsprozesse« behandelt. Viele der Lerner, insbesondere die Hochbegabten, erlebten Rückschläge, lernten Frustrationen zu überwinden, aber auch ihre Ergebnisse im Zusammenhang darzustellen und niederzuschreiben.

Ein extrem schwieriges, inzwischen gelungenes Experiment zur Sonolumineszenz (links die Vorbesprechung unter Beteiligung des Autors): Luftblasen werden durch Ultraschall zum Kollabieren gebracht. Dabei erhitzen sie sich und geben für kurze Zeit Licht ab.


KLAUS-PETER HAUPT

Wirbelsturm im Labor: Ein alter Kühlerventilator bläst Luft in ein spiralig aufgewickeltes Rohr (rechts), in dem ein stabiler Tornado entsteht.

Zur öffentlichen Abschlusspräsentation durfte jede Gruppe einen Klassenraum mit Experiment, Posterausstellung und Computerpräsentationen gestalten und den Besuchern ihr Projekt erläutern. Gerade diese Präsentation hat die Arbeit in den Wochen vorher extrem motiviert und strukturiert. Für die Schüler waren die Gespräche mit dem fachkundigen Publikum und die Anerkennung durch die Besucher eine so positive Erfahrung, dass sie unbedingt wieder ein solches Projekt durchführen wollten. Mit ihrem Interesse und ihrer Begabung sind sie ernst genommen worden: Die Besucher nahmen nicht nur den Eifer der »Kinder« wohlwollend-väterlich zur Kenntnis, sondern gewannen Geschmack an der Chaosphysik.

Diese Präsentationen zum Ende jedes Schuljahrs sind fester Bestandteil unserer Arbeit geworden.

Relativitätstheorie – aber richtig

Für das nächste Projekt haben die anfangs 16, später 19 Teilnehmer aus den Jahrgangsstufen 8 bis 12 das Thema des Kurses sowie Aufbau und Vorgehen bereits selbst bestimmt. Elementarteilchenphysik sollte es sein, mitsamt der zugehörigen Quantenmechanik und Relativitätstheorie. Und zwar wollte man die Formeln aus der Relativitätstheorie nicht nur angeschrieben, sondern hergeleitet haben.

Diese Anforderung war dann doch nicht ohne Weiteres mit verfügbarer Literatur zu bewältigen. Arbeitsmaterial vom Deutschen Elektronen-Synchrotron Desy aus Hamburg und Schulexperimente waren hilfreich; aber für die Herleitung der Formeln entwickelte ich in den Herbstferien acht Lernstationen (Texte und Arbeitsanweisungen), an denen die Schüler dann bis zu den Weihnachtsferien arbeiteten.

In den Herbstferien 2002 wanderte der PhysikClub erstmals aus den Räumen der Schule heraus – auf eine Berghütte in den Alpen. Studenten und Doktoranden der Astrophysik veranstalteten Arbeitsgruppen zu Themen aus Astronomie und Physik, von der schlichten Einführung in die Beobachtungen des Sternhimmels über den Bau eines Spektroskops und die Spektralanalyse astronomischer Objekte bis hin zur Gewinnung und Auswertung astronomischer Daten mit modernster Software und zur Visualisierung kosmologischer Modelle. Zu den Jugendlichen aus dem PhysikClub kamen noch erwachsene Amateurastronomen und Physiker aus dem Astronomischen Arbeitskreis Kassel e. V. hinzu: eine sehr heterogene Gruppe, die gleichwohl auch bei der achtstündigen Hochgebirgswanderung im tiefen Neuschnee und dem abschließenden Bastelspiel – wer baut aus vorgegebenem Material ▷



nach festgelegten Regeln den höchsten Turm? – ihren Spaß hatte.

Der Anstoß zu unserem nächsten Projekt kam von der Universität Mainz. Dort hatten die Physikdidaktiker ein überraschend einfaches Gerät zum Nachweis von Myonen entwickelt. Diese Elementarteilchen entstehen durch die kosmische Strahlung in der Hochatmosphäre und sind so kurzlebig, dass sie eigentlich bereits in oberen Luftschichten wieder zerfallen sein müssten. Aber durch relativistische Effekte wegen ihrer hohen Eigengeschwindigkeit vergeht für sie selbst die Zeit so langsam, dass sie bis zum Erdboden kommen.

Das Nachweisgerät besteht aus einer schlichten Thermoskanne (der »Kamio-Kanne«, in Anspielung an den – viel größeren – japanischen Neutrinodetektor Kamiokande) mit Photomultiplier und Elektronik zur Messwerterfassung; das stellten mir die Physikdidaktiker aus Mainz kostenfrei zur Verfügung, und wir konnten das Experiment innerhalb des PhysikClubs aufbauen und durchführen.

Einige Mitglieder wollten das Experiment über den schlichten Demonstrationsversuch hinaus weiterentwickeln, bildeten selbstständig vier Arbeitsgruppen und machten sich ans Werk. Mit Hochspannungsnetzteilen von der Universität Kassel konnten wir das Experiment in mehreren ganztägigen Messzyklen im Mai 2003 durchführen und anschließend öffentlich präsentieren.

Bereits in den darauf folgenden Sommerferien setzten neun Mitglieder des PhysikClubs zusammen mit fünf Physikern des Astronomischen Arbeitskreises Kassel diese Forschungen fort: Sie untersuchten die Absorption der Myonen im Gestein der französischen Alpen. Die Versuchsanordnung mit Netzteilen, schweren Batterien und Oszilloskopen mussten wir eigenhändig vom Tal in einen hoch gelegenen Höhleneingang tragen. Dort haben wir 24 Stunden lang die Intensität der Myonenstrahlung im Vergleich zu einer nicht überdeckten Fläche auf gleicher Höhe gemessen.

Während der Messzyklen gab es aufwändige längere Exkursionen in nicht ausgebaute große Höhlen, teilweise mit Schlauchbooten und kurzen Seilstrecken. Die Überwindung der körperlichen und psychischen Belastungen stärkt nachhaltig das Selbstvertrauen. Die Leitung konnte ich selbst übernehmen, da ich zusammen mit den anderen erwachsenen Mitfahrern lange Erfahrungen im Höhlenklettern besitze. Es gibt aber viele Teams, die solche Exkursionen organisieren und sicher betreuen.

Aus den letzten Projekten ist eine »Jugend-forscht«-Arbeit entstanden: Drei Schüler kamen mit »Kosmische Myonen in der Thermoskanne« bis in den Bundeswettbewerb und erhielten einen Sonderpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Unter anderem verbesserten sie das ursprüngliche Messverfahren, untersuchten die Richtungsabhängigkeit von Messeinrichtung und urspünglicher Strahlung und entwickelten ein mathematisches Modell hierfür.

Große Themenvielfalt

Ein Projekt zur Netzwerktheorie bezog zahlreiche Schulfächer ein, darunter auch Englisch, da die gesamte Literatur nur in dieser Sprache zur Verfügung stand (und nicht einfach war). Einige Teilnehmer, die von Anfang an dabei waren, konnten das konstruktivistische Unterrichtsmodell inzwischen noch weiter gehend realisieren, indem sie die typische Lehreraufgabe – Literatur sichten und Projektthemen finden – selbst in die Hand nahmen. Es kamen fünf Arbeitsgruppen zu Stande, von denen drei es zu Preisen (zwei dritte und ein zweiter) im hessischen Landeswettbewerb von »Jugend forscht« brachten. Bei dieser Gelegenheit wurde auch der PhysikClub mit dem Hessischen Schulpreis 2005 der Kultusministerin ausgezeichnet.

Dasselbe Thema erweiterten und vertieften wir in einem sechstägigen Workshop mit besonders begabten Jugendlichen und Erwachsenen in einem Jugendheim auf der schwäbischen Alb. Die Teilnehmer wandten ihre Kenntnisse über chaotische Systeme und Netzwerktheorie mit großem Erfolg zur Übertragung der Prinzipien der biologischen Evolution auf physikalische Systeme an. Natürlich gab es wieder ein kognitiv und kreativ anregendes Bastelspiel und eine Höhlenexkursion.

In der Folgezeit ist der PhysikClub zu einer sehr vielseitigen Institution herangewachsen. Teilweise denken sich die Teilnehmer die Forschungsprojekte selbst aus; die anderen können aus einer bunten Mischung von Vorschlägen von mir auswählen. Am Ende des Schuljahrs 2004/2005 hatten wir eine dreitägige Präsentation auf 600 Quadratmetern Fläche zu bieten, samt Festvortrag und selbst gestaltetem Musikprogramm, das mehr als 1000 Gäste anzog.

Seit August 2004 hat der Club ungefähr 50 Teilnehmer und eine unüber-

Ein Basslautsprecher mit durchlöchertem Plastikeimer bläst Rauchringe in Serie, die über 20 Meter durch den Raum fliegen (unten), aufeinander prallen und sich durchdringen.

BEIDE FOTOS: HOLGER HOHE



schaubare Vielfalt von Projekten. Referendare und ehemalige Teilnehmer helfen mit, das stark angewachsene Programm zu bewältigen. Es gab Sach- und Geldspenden, unter anderem von der Kasseler Sparkasse und der Klaus-Tschira-Stiftung. Der Club hat nun zwei eigene Räume mit Bibliothek und Computern sowie zahlreiche eigene Geräte.

Man trifft sich, bringt mal Kuchen mit, macht auch mal Musik und trotzdem wird intensiv immer an Physik gearbeitet. Viele Freundschaften über die Grenzen einer Schule hinaus sind entstanden. Die Arbeit im Club hat Selbstbewusstsein vermittelt, der tolerierende, helfende Umgang miteinander hat auch Schüler, welche die Schule als problematisch empfanden (oder als problematisch wahrgenommen wurden), zur Integration geführt. Die Funktion des Clubs und der Workshops geht weit über die Beschäftigung mit Physik hinaus.

Viele der Jugendlichen halten inzwischen in ihren eigenen Schulen Vorträge über ihre Projekte. Einige sind Mitarbeiter im Planetarium Kassel geworden und halten dort öffentliche Vorträge.

Das konstruktivistische Unterrichtsmodell

So wie die Realität von unseren Sinnesorganen nicht einfach abgebildet wird, sondern der Organismus sich aus den Sinneswahrnehmungen eine eigene Wirklichkeit konstruiert, so können wir auch Wissen nicht einfach übernehmen, sondern müssen es aktiv konstruieren. Das ist die Kernthese eines konstruktivistischen Lernmodells.

Für die Aneignung von Wissen gilt Ähnliches wie für die einer Wirklichkeit:

▶ Vorerfahrung und genetische Dispositionen beeinflussen die Konstruktion von Wissen.

▶ Gefühle spielen eine wichtige Rolle, es findet ständig eine emotionale Bewertung neuen Wissens statt.

▶ Nur wenn Wissen zur Stärkung und Ausbildung der eigenen Identität beiträgt, wird es in die Konstruktion einbezogen.

▶ Jede erworbene Wissenskonstruktion ist zunächst subjektiv und muss durch Gespräche und Dispute intersubjektiv gesichert werden.

Im »PhysikClub« greifen wir diese Grundsätze insbesondere wie folgt auf:

▶ *auf die Person bezogen:* Die Teilnehmer bauen das selbst erworbene Wissen in ihr Vorwissen mit ein, da sie es unmittelbar im eigenen Interesse anwenden. Sie handeln in allen Projektphasen – Planung, Durchführung und Kontrolle – in eigener Verantwortung. Durch die öffentliche Präsentation, sowohl vor fachlich vorgebildeten Besuchern als auch vor Laien, trainieren sie den Gebrauch von Fach- und Alltagssprache.

▶ *inhaltlich:* Alle Projekte behandeln offene, authentische Probleme, haben exemplarische Bedeutung für die Physik und gehen häufig über das Fach hinaus.

▶ *sozial-kommunikativ:* Lernen im Kollektiv, in kleinen Projektgruppen wie im Plenum, gegenseitige Beratung und Gesprächsforen, teilweise nach den Treffen, bilden den Kernpunkt der Arbeit. Trotzdem bilden individuelle Interessen und Fähigkeiten wichtige Stützpunkte der Arbeit, auch für die Lösung von Problemen anderer Gruppen.

Es gelingt den Teilnehmern, Schwierigkeiten und Verständnisprobleme angstfrei auszudrücken und in gegenseitiger Beratung, manchmal auch mit den Betreuern, zu klären. Die Arbeits- und Forschungsprozesse werden in metakognitiven Gesprächen bewusst gemacht und hinterfragt. Ständiger Wechsel der Methoden, vom eigenverantwortlichen Arbeiten bis hin zum Vortrag, ist die Regel. Der Lehrer dominiert nicht durch einen Wissensvorsprung, sondern ist gleichberechtigter Gesprächspartner und manchmal auch nur ein Lernberater.

Zurück in den Regelunterricht

Übrigens: Das von mir vertretene konstruktivistische Unterrichtsmodell ist nicht in erster Linie eine Anleitung für besondere Veranstaltungen wie den PhysikClub oder für die Hochbegabtenförderung. Es ist auch und gerade für den Regelunterricht verwendbar. Dazu habe ich folgende Erfahrungen beizutragen:

Konstruktivistischer Unterricht

▶ ermöglicht nicht nur einen individuellen und vertieften Zugang zum Inhalt, sondern erweitert auch die metakognitiven Kompetenzen;

▶ wird nur selten praktiziert, da es den Lehrenden schwer fällt, sich auf eigenständiges Vorgehen der Lernenden einzulassen;

▶ begünstigt eine kooperative Arbeitsdisziplin, Störungen und Arbeitsverweigerungen treten seltener auf;

▶ fördert nicht nur Hochbegabte, sondern alle Begabungen, insbesondere gibt es sehr positive Rückmeldungen auch von lernschwächeren Schülern;

▶ ist besonders geeignet, Hochbegabte zu fordern und zu motivieren. Hochbegabte haben nicht immer eine besonders ausgeprägte Anstrengungs- und Leistungsbereitschaft, sondern eher ein Defizit an Lernerfahrung und Arbeitsstrategien. Sie sollen deswegen nicht nur durch zusätzlichen Unterricht beschäftigt werden, sondern die individuellen Aspekte des Regelunterrichts entdecken und ihre metakognitiven Kompetenzen erweitern. Hochbegabte brauchen aber auch Betätigungsfelder, in denen sie in Gruppen selbstbestimmte, anspruchsvolle Forschungsaufgaben lösen können. Hier können und müssen sie auch ihre Grenzen erfahren und übersteigen. Zumindest in naturwissenschaftlichen Leistungskursen sind nicht die Inhalte zu anspruchslos, sondern der Weg ist zu fremdbestimmt und so intensiv vorbereitet und strukturiert, dass er für die Hochbegabten seinen Reiz verliert.

Die Arbeit des PhysikClubs ist aus den konstruktivistischen Unterrichtserfahrungen des Regelunterrichts entstanden und hat sich rückwirkend auch positiv auf den Regelunterricht für alle Beteiligten ausgewirkt. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Klaus-Peter Haupt, Diplomphysiker, leitet als Studiendirektor die Ausbildung und Fortbildung der Physiklehrer am Studienseminar für Gymnasien in Kassel. Dort unterrichtet er am Gymnasium Albert-Schweitzer-Schule, ist Vorsitzender des Astronomischen Arbeitskreises und Mitarbeiter im Planetarium.

Spezielle Relativitätstheorie. Von Klaus-Peter Haupt. Loseblattsammlung, Unterrichts-Materialien Physik. Stark, Freising 2003

Konstruktivismus im Physikunterricht der Sekundarstufe II. Von Peter Labudde. Haupt, Bern 2000

Erfahrungen mit selbstständigem Lernen im Grundkurs Philosophie; Beispiele eigenständigen Lernens im Fach Physik. Beide Beiträge von Klaus-Peter Haupt in: Gymnasium aktuell. Von Klaus Moegling (Hg.). Klinkhardt, Bad Heilbrunn 2000

Experiments in science and science teaching. Von D. Hodson in: Educational Philosophy and Theory, Bd. 20, Nr. 2, 1988

Die Ideen- und Materialsammlung zum Thema »Chaosphysik« ist auf der Website www.wissenschaft-schulen.de abrufbar.

Diesen Artikel können Sie auch anhören, siehe: www.spektrum.de/audio

Einstein in der Chemie



Da Elektronen in Atomen fast Lichtgeschwindigkeit erreichen können, beeinflusst die Spezielle Relativitätstheorie auch die Eigenschaften von Elementen und ihren Verbindungen. Ohne sie wäre Gold zum Beispiel nicht gelb.



Von Martin Kaupp

Die meisten Menschen halten Einsteins Spezielle Relativitätstheorie für schwer verständlich und glauben, dass sie in ihrem Alltag keine Rolle spielt. Doch sie irren sich. Den ersten Punkt widerlegen die vielen Publikationen zum Einstein-Jahr 2005, die teils in sehr anschaulicher Weise die Grundprinzipien der Theorie erläutern (siehe »Einstein und die Folgen«, Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2005). Diese besagt im Kern, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum konstant ist und kein materielles Objekt sie je völlig erreichen kann. Je mehr es sich ihr annähert, desto stärker dehnt sich die Zeit, während es selbst gestaucht wird und seine Masse zunimmt.

Und wie steht es mit relativistischen Effekten im täglichen Leben? Wenn überhaupt jemand etwas darüber weiß, denkt er meist an komplizierte physikalisch-technische Anwendungen. So erfordert die zielgenaue Ablenkung des Elektronenstrahls in der Bildröhre eines Fernsehapparats die Berücksichtigung der Speziellen Relativitätstheorie; denn die Elektronen können kurz vor dem Aufprall am Schirm die halbe Lichtgeschwindigkeit erreichen, sodass Abweichungen vom klassischen Verhalten bereits spürbar werden. Ein anderes Beispiel ist das *Global Positioning System* (GPS). Für die genaue Ortsbestimmung mittels Satelliten muss man sowohl die Spezielle als auch die Allgemeine Relativitätstheorie heranziehen. Schließlich fallen manchem vielleicht die Atomkraftwerke ein. Die Umwandlung von Masse in Energie bei der Kernspaltung folgt Einsteins berühmter Gleichung $E = mc^2$, die sich aus der Speziellen Relativitätstheorie ergibt.

Doch damit ist der Einfluss dieser Theorie auf unser Leben bei Weitem nicht erschöpft. Tatsächlich betrifft sie auch viel profanere Dinge – was seltsamerweise kaum ein Beitrag zum Einstein-Jahr erwähnt hat. Würde die Relativitätstheorie nicht gelten, gäbe es zum Beispiel weder Quecksilberthermometer noch langlebige elektrische Glühbirnen, wie wir sie kennen. Auch Gold verlöre seinen gelben Glanz und wäre grauweiß wie Silber.

Selbst der wissenschaftliche Laie müsste sich eigentlich wundern, warum Quecksilber als einziges Metall bei Zimmertemperatur flüssig ist. Und dem Chemiker ergeht es nicht viel besser. Das Metall steht im Periodensystem unter Zink und Cadmium. Warum sein Schmelzpunkt so niedrig ist und bei etwa –39 Grad Celsius liegt, erscheint auf den ersten Blick rätselhaft. Es erklärt sich jedoch, wenn man die Spezielle Relativitätstheorie heranzieht (siehe unten).

Tatsächlich können Elektronen nicht nur in Teilchenbeschleunigern, sondern auch in ganz normaler Materie, die aus Atomen, Molekülen oder Kristallverbänden aufgebaut ist, so hohe Geschwindigkeiten erreichen, dass sie »relativistisch« werden – wodurch unter anderem ihre Masse zunimmt. Dies gilt vor allem dann, wenn schwere Atomkerne vorliegen – wie bei Quecksilber, Wolfram oder Gold. Diese Kerne haben eine so hohe positive Ladung, dass sie Elektronen, die ihnen nahe kommen, enorm beschleunigen. Dann aber versagt die übliche, rein quantenmechanische Beschreibung des ▷



Wegen seines gelben Glanzes ist Gold schon in frühen Kulturen – so auch bei den Thrakern, von denen dieses goldene Pferd stammt – das bevorzugte Material für Schmuck und Kultobjekte. Diese Wertschätzung verdankt es letztlich der Speziellen Relativitätstheorie: Ohne relativistische Effekte wäre es grauweiß wie Silber, das im Periodensystem der Elemente über dem Gold steht.

REGIONALHISTORISCHES MUSEUM RAZGRAD, FOTO: IVO HADJIMISHEV

▷ Aufbaus von Atomen, Molekülen oder Festkörpern.

Schon 1928 vereinigte der britische Physiker Paul A.M. Dirac deshalb die Quantenmechanik mit der Speziellen Relativitätstheorie, wofür er 1933 zusammen mit Erwin Schrödinger den Nobelpreis für Physik erhielt. Am einfachen Modell eines Atoms mit der Kernladung Z und nur einem Elektron lässt sich zeigen, dass dieses in Kernnähe im Durchschnitt Z/1,37 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreicht. Beim Quecksilberatom mit Z = 80 ergibt das zum Beispiel 58 Prozent. Infolgedessen wird das Elektron um 23 Prozent schwerer. Im gleichen Verhältnis schrumpft auch sein mittlerer Abstand vom Kern. Dadurch wiederum erhöht sich die elektrostatische Anziehung zwischen beiden, und die Energie des Systems sinkt. Experten bezeichnen den Effekt als Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion.

Pikanterweise glaubte Dirac selbst, dass relativistische Effekte in der Chemie keine nennenswerte Rolle spielten. Für die chemischen wie auch die meisten physikalischen Eigenschaften von Materialien sind nämlich die so genannten Valenzelektronen verantwortlich. Diese aber befinden sich in den Randbezirken des Atoms und geraten nur selten in die Nähe des Kerns. Deshalb sollten sie auch keine hohen Geschwindigkeiten erreichen und kaum von relativistischen Effekten beeinflusst werden.

Noch bis in die 1970er Jahre teilten die meisten Chemiker diese Ansicht. Doch dann zeichneten genauere quantenmechanische Berechnungen an Systemen mit schweren Atomen ein anderes Bild. Verantwortlich für das Umdenken waren Forscher wie Pekka Pyykkö von der Universität Helsinki (Finnland) und Ian P. Grant von der Universität Oxford (Großbritannien) sowie der Franzose Jean-Pierre Desclaux und der Amerikaner Kenneth S. Pitzer (beide inzwischen verstorben). Sie konnten zeigen, dass auch kurze Aufenthalte in Kernnähe ausreichen, um erhebliche relativistische Effekte bei den äußeren Elektronen hervorzurufen. Hinzu kommen indirekte Einflüsse: Die inneren Elektronen, die der Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion unterliegen, interagieren mit den äußeren und geben die Effekte so an diese weiter.

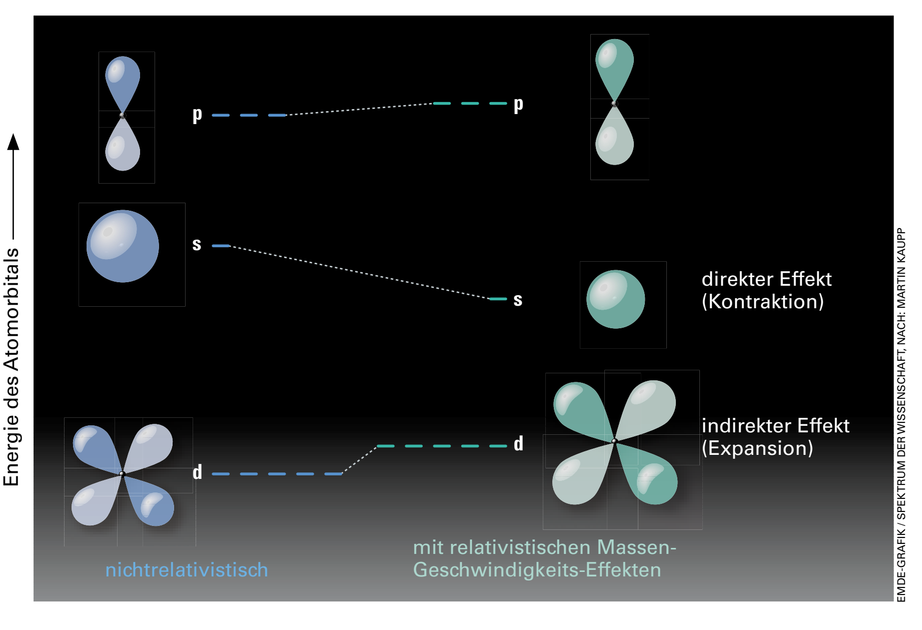
Elektronenwolken um den Kern

Um die Zusammenhänge im Einzelnen zu verstehen, müssen wir zunächst allerdings den Aufbau der Elektronenhülle in Atomen genauer betrachten. Schon 1913 stellte Nils Bohr sein berühmtes halbklassisches Atommodell auf. Darin bewegen sich die Elektronen auf kreisförmigen Bahnen, die durch eine Hauptquantenzahl n gekennzeichnet sind, um den Kern. Wenig später berücksichtigte Sommerfeld auch elliptische Bahnen. Für sie führte er eine Nebenquantenzahl l ein, die alle Werte zwischen 0 und n–1 annehmen kann. Je nach diesem Wert sprechen die Chemiker von s- (l=0), p- (l=1), d- (l=2) und f-Elektronen (l=3).

Gemäß Heisenbergs Unschärferelation lassen sich Ort und Impuls eines Elektrons allerdings nicht beliebig genau angeben. Deshalb gibt es die von Bohr postulierten Bahnen nicht wirklich. Die Bewegung eines Elektrons ist vielmehr durch seine quantenmechanische Wellenfunktion bestimmt, die keine genauen Ortskoordinaten zu einem gegebenen Zeitpunkt liefert. Ihr Quadrat ergibt lediglich Wahrscheinlichkeiten dafür, dass sich das Teilchen jeweils an einem bestimmten Punkt befindet. An die Stelle der Bahnen sind deshalb heute so genannte Orbitale getreten. Sie entsprechen dem Raumbereich, in dem sich das Elektron mit hoher Wahrscheinlichkeit aufhält (der genaue Wert variiert je nach Darstellung zwischen 50 und 99 Prozent).

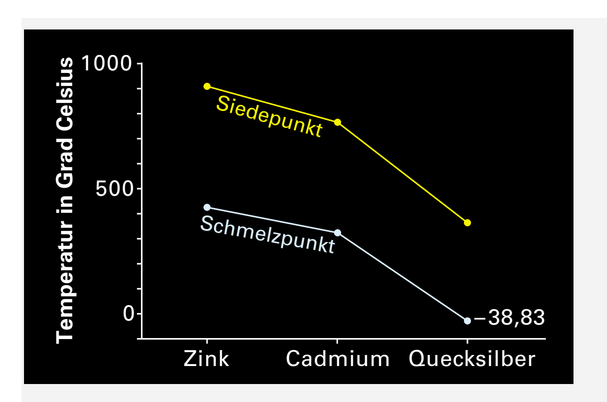
Bei s-Elektronen haben die Orbitale Kugelsymmetrie. Doch nimmt ihre Komplexität mit steigender Nebenquantenzahl zu, weil jeweils eine ebene Knotenfläche hinzukommt, die durch den Atomkern verläuft und in der die Aufenthaltswahrscheinlichkeit null ist. So haben die p-Elektronen hantelförmige Orbitale. Bei den d- und f-Elektronen wird die Geometrie noch vertrackter. Wichtig für unsere Betrachtungen ist jedoch nur, dass für steigende Nebenquantenzahlen die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in Kernnähe immer weiter sinkt. Ein s-Elektron kommt also öfter dicht am Kern vorbei als ein p- und dieses wiederum öfter als ein d-Elektron und so weiter.

Direkte relativistische Effekte sind deshalb bei s-Elektronen am ausgeprägtesten. Durch Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion verringert sich ihr mittlerer



◀ **Wenn Elektronen in der Hülle schwerer Atomkerne dem Kern nahe kommen, können sie fast Lichtgeschwindigkeit erreichen. Dadurch erhöht sich gemäß der Speziellen Relativitätstheorie ihre Masse, während ihr mittlerer Abstand vom Kern abnimmt. Entsprechend schrumpft das zugehörige Orbital und seine Energie sinkt. Das gilt vor allem für sogenannte s-Elektronen, deren Aufenthaltswahrscheinlichkeit am Kern relativ groß ist. Zugleich werden d-Elektronen, die sich im Mittel weiter draußen befinden, elektrostatisch besser abgeschirmt. Ihre Orbitale dehnen sich folglich aus und werden energetisch angehoben. Bei p-Elektronen gleichen sich beide Effekte annähernd aus.**

Quecksilber bleibt bis fast –39 Grad Celsius flüssig und eignet sich deshalb hervorragend für Thermometer. Den niedrigsten Schmelzpunkt aller Metalle verdankt es relativistischen Effekten, welche die Orbitale seiner Valenzelektronen schrumpfen lassen, sodass die Bindungen zwischen den Atomen im Metallgitter relativ schwach sind.



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Abstand vom Kern, was die wechselseitige elektrostatische Anziehung erhöht. Folglich erniedrigt sich das Energieniveau dieser Elektronen, und sie lassen sich schwerer aus dem Atom herausschlagen.

Bei d- und f-Elektronen verhält es sich genau umgekehrt. Sie unterliegen kaum direkten relativistischen Effekten, weil sie sich nur äußerst selten in Kernnähe aufhalten. Dafür sind sie indirekten Einflüssen durch die inneren s-Elektronen ausgesetzt. Da sich diese wegen der Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion dichter an den Kern herangeschoben haben, schirmen sie dessen positive Ladung besser ab. Folglich »spüren« die d- und f-Elektronen eine geringere elektrostatische Anziehung und rücken weiter nach außen. Dadurch erhöht sich ihr Energieniveau, sodass man sie leichter aus dem Atom entfernen kann.

Bei den p-Elektronen schließlich heben sich die direkten und indirekten relativistischen Effekte weit gehend auf. Sie werden also im Endergebnis weniger beeinflusst.

Direkte wie indirekte Effekte der Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion wachsen sehr stark mit zunehmender Kernladung an und machen sich daher umso mehr bemerkbar, je weiter unten ein chemisches Element im Periodensystem steht. Das wirkt sich zunächst einmal auf die Größe aus. Betrachten wir zum Beispiel das Gold. Es befindet sich eine Reihe tiefer als das Silber. Dadurch enthält sein Atom immerhin 32 Elektronen mehr und hat fast die doppelte Masse. Trotzdem ist es wegen der starken Kontraktion der äußeren s-Orbitale nicht nur nicht größer, sondern sogar geringfügig kleiner als ein Silberatom.

Noch stärker sollte der Effekt beim Element Röntgenium sein, das sich direkt unter dem Gold in der siebten Reihe befindet. Es kommt allerdings nicht natürlich vor und ließ sich bisher nur in winzigen Mengen in Teilchenbeschleunigern erzeugen. Seine Größe konnte deshalb noch nicht bestimmt werden. Berechnungen sagen jedoch voraus, dass sein Durchmesser wegen der starken relativistischen Kontraktion der äußeren s-Orbitale sogar geringer sein dürfte als der von Kupfer, dem leichtesten Element der Gruppe.

Warum ist Gold gelb?

Relativistische Effekte betreffen freilich nicht nur die Größe, sondern auch das chemische Verhalten und die Materialeigenschaften. Die Elemente der sechsten Periode unterscheiden sich deshalb in vieler Hinsicht ganz erheblich von ihren leichteren Gegenstücken in der Reihe darüber. Beispiele dafür habe ich schon genannt. Das vielleicht spektakulärste ist die charakteristische sattgelbe Farbe des Goldes, verglichen mit dem Grauweiß des leichteren Silbers. Wie kommt sie zu Stande?

Bei Metallen verbreitern sich die Orbitale der Einzelatome zu Bändern, die sich über den gesamten Kristall erstrecken. Die äußersten Elektronen befinden sich dann im so genannten Valenzband. Beim Gold sind dies d-Elektronen, deren Energie sich, wie oben geschildert, durch indirekte relativistische Effekte erhöht. Dadurch wird das Valenzband insgesamt angehoben. Über ihm befindet sich – wie bei Metallen üblich – das leere »Leitungsband«. Es wird beim Gold von s-Orbitalen gebildet. Deren Energie aber sinkt durch die relativistische Massengeschwindigkeits-Kontraktion ab.

Dadurch verringert sich der Abstand zwischen den beiden Bändern. Während er beim Silber so groß ist, dass nur ultraviolette Lichtquanten Elektronen aus dem Valenz- in das Leitungsband anheben können, genügen beim Gold energieärmere Photonen aus dem blauen Spektralbereich. Gold absorbiert deshalb blaues Licht und erscheint in der Komplementärfarbe, nämlich gelb.

Ähnlich lässt sich der ungewöhnlich niedrige Schmelzpunkt von Quecksilber erklären. Er beruht letztlich auf sehr schwachen Bindungskräften im Kristallgitter. Für diese Kräfte sorgen in der Spalte des Periodensystems, in der sich Zink, Cadmium und Quecksilber befinden – Chemiker sprechen von der zweiten Nebengruppe –, gleichermaßen s- und p-Elektronen. Damit eine starke Bindung zu Stande kommt, müssen diese sich mischen oder hybridisieren, wie es fachsprachlich heißt. Das können sie freilich nur, wenn ihre Orbitale sich weit gehend überlappen. Nun sind beim Quecksilber wie beim Gold die Orbitale der äußeren s-Elektronen durch relativis- ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ Im Wolfram vergrößern im Gegensatz zum Quecksilber indirekte relativistische Effekte die Orbitale der Valenzelektronen, was die Bindungen zwischen den Atomen im Metallgitter verstärkt. Daraus resultiert ein sehr hoher Schmelz- und Siedepunkt, weshalb das Metall als in der Hitze leuchtender Draht in Glühbirnen dient.

▷ tische Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion geschrumpft, diejenigen der p-Orbitale dagegen nicht. Beide passen von ihrer Größe her also nur mehr schlecht zusammen und können sich deshalb kaum noch vermengen. Die Folge sind schwache Bindungskräfte und ein sehr niedriger Schmelzpunkt.

Anders als beim Quecksilber werden die Bindungskräfte der weiter links im Periodensystem stehenden Übergangsmetalle vor allem durch d-Elektronen bestimmt. Diese aber dehnen sich durch indirekte relativistische Effekte aus. Das führt zu stärkeren Bindungen zwischen den Atomen, weshalb Schwermetalle wie Wolfram, Rhenium, Osmium oder Iridium höhere Schmelz- und Siedepunkte haben als die leichteren Elemente innerhalb derselben Gruppe. Das nutzt man zum Beispiel in herkömmlichen Glühbirnen, deren heißer, leuchtender Draht aus Wolfram besteht. Der hohe Schmelz- und Siedepunkt des Metalls garantiert dabei eine lange Lebensdauer, weil beim Betrieb jeweils nur wenig Material durch Verdampfung verloren geht.

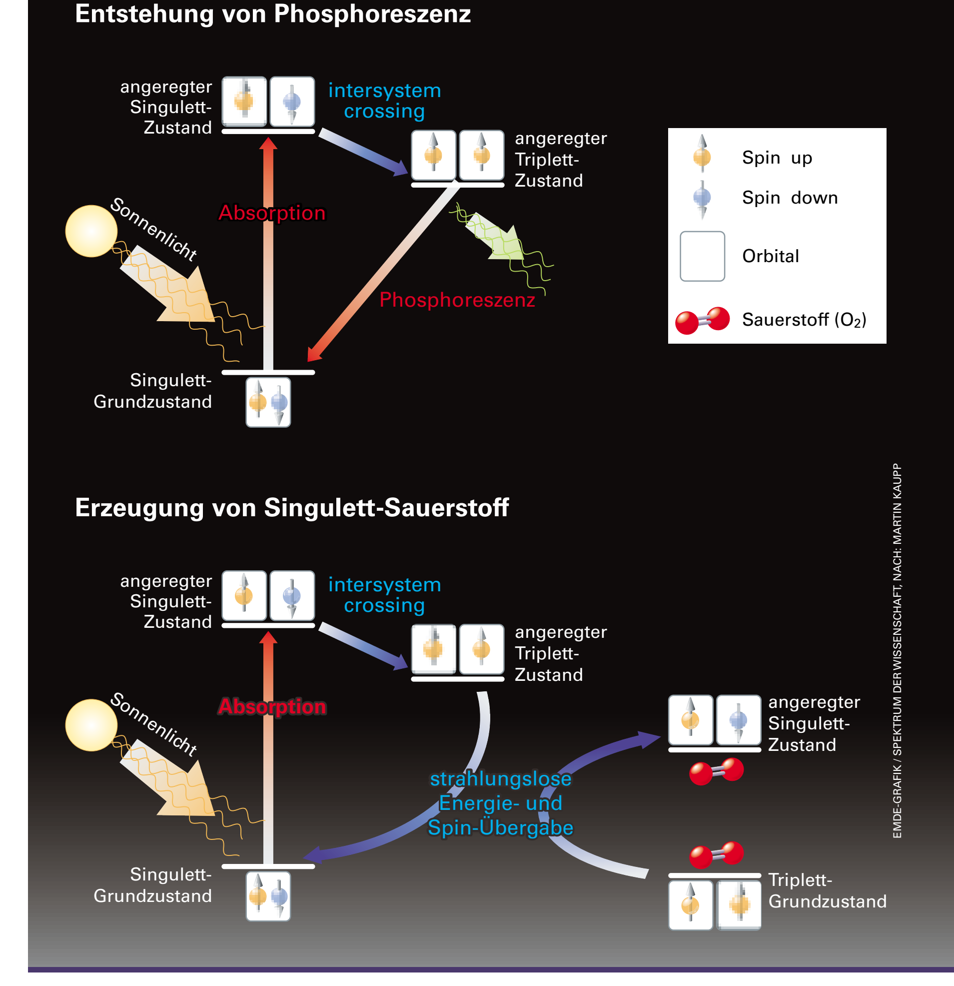
Was Blei batterietauglich macht

Relativistische Effekte beeinflussen aber nicht nur die physikalischen, sondern auch die chemischen Eigenschaften der Elemente. Das gilt etwa für das so genannte Redoxpotenzial, das heißt die Bereitschaft von Atomen oder Molekülen, Elektronen abzugeben oder aufzunehmen. So wird in der vierten Hauptgruppe des Periodensystems die Oxidationsstufe +IV vom Kohlenstoff über Silizium, Germanium und Zinn zum Blei hin immer instabiler, weshalb bei Letzterem statt des vierwertigen der zweiwertige Zustand dominiert.

Dahinter steckt im Grunde derselbe Effekt, dem Quecksilber seinen niedrigen Schmelzpunkt verdankt. Damit Kohlenstoff vier gleichwertige Bindungen bilden kann, müssen sich seine äußeren s- und p-Orbitale mischen. Gleiches gilt für das Blei. Hier aber sind wegen der Massen-Geschwindigkeits-Kontraktion die s-Orbitale geschrumpft und kleiner als die p-Orbitale, weshalb beide schlecht miteinander hybridisieren können. Die Instabilität von Verbindungen des vierwertigen Bleis bedeutet, dass sie stark oxidierend wirken. Das erklärt die Bedeutung dieses Metalls für Autobatterien oder ähnliche Akkumulatoren.

Genau entgegengesetzt verhält es sich bei den Übergangsmetallen. In ihrem Fall sorgt die relativistische Expansion der d-Elektronen dafür, dass sie leichter abgegeben werden können. Das stabilisiert bei den schwereren Elementen die höheren Oxidationsstufen.

Ein Beispiel mit biochemischer Bedeutung findet sich in der sechsten Nebengruppe. Hier ist das Wolfram im sechswertigen Zustand kein so starkes Oxidationsmittel wie Molybdän. Die beiden Elemente spielen als einzige Übergangsmetalle aus ihrer jeweiligen Periode eine essenzielle Rolle in Lebewesen. Molybdän kommt in Enzymen vor, die in unzähligen Organismen – auch beim Menschen – an Oxidationsprozessen mitwirken. Außerdem ist es ein Bestandteil der Nitrogenase, mit der bestimmte Bodenbakterien Stickstoff aus der Luft fixieren und ihn als Nährstoff ihren Wirtspflanzen zur Verfügung stellen. Wolfram-Enzyme wurden dagegen bislang nur in hyperthermophilen »Bakterien« gefun-



den, die bei Temperaturen von 100 Grad Celsius und mehr an heißen vulkanischen Quellen am Meeresboden leben. Unter diesen Bedingungen muss – und darf – die Oxidationskraft nicht so groß sein. Deshalb ist das schwerere Wolfram hier besser geeignet als Molybdän.

Man kann vermuten, dass die Natur mit dem Abkühlen der Erdoberfläche von den Wolfram-Enzymen in den uralten thermophilen Archaeen zu den heute dominierenden Molybdän-Verbindungen überging. Wenn man so will, wechselte sie dabei von einem stark zu einem schwach relativistischen Element.

Wie Platin als Katalysator wirkt

Auch das Edelmetall Platin unterscheidet sich in seinen chemischen Eigenschaften deutlich von seinem leichteren Homologen Palladium. So kann es auf Grund der indirekten relativistischen Expansion seiner äußeren d-Orbitale kleine Moleküle aus der Luft stärker an seine Oberfläche binden und dann spalten. Dieser Eigenschaft verdankt es seinen Einsatz als »Beschleuniger« für vielerlei chemische Reaktionen. Auch die Abgaskatalysatoren von Automobilen enthalten aus diesem Grund Platin.

Geht man im Periodensystem noch weiter nach unten, gelangt man zu den Trans-Uran-Elementen. Die meisten ließen sich bislang nur in großen Teilchenbeschleunigern in extrem geringen Mengen oder als Einzelatome künstlich erzeugen. Bei ihnen könnten relativistische Effekte so stark werden, dass sogar das Periodensystem selbst seine ordnende Kraft verliert: Die Extrapolation der Eigenschaften von den leichteren zu den schwereren Elementen einer Gruppe wäre dann unmöglich. Derzeit ergibt sich diese Vermutung allerdings nur aus quantenmechanischen Rechnungen, da chemische Experimente mit den schwersten bekannten Elementen bisher gar nicht oder nicht mit der erforderlichen Genauigkeit durchführbar sind.

Eine große Rolle spielt Einsteins Spezielle Relativitätstheorie schließlich bei einem Phänomen, dessen Bedeutung von der Physik über die Chemie und Biologie bis hin zur Medizin reicht. Es betrifft alle nicht kugelsymmetrischen Orbitale und lässt sich zwar mit einer halbklassischen Betrachtung leicht veranschaulichen, aber nicht quantitativ beschreiben.

Im Bohr'schen Atommodell sollten die um den Kern kreisenden Elektronen wie der Strom in einer Drahtschlinge ein Magnetfeld erzeugen. Die Quantentheorie modifiziert diese Aussage allerdings. Demnach verursachen nur Elektronen mit einer Nebenquantenzahl größer null ein magnetisches Bahnmoment, also solche in p-, d- und f-Orbitalen. Hinzu kommt ein zweiter Effekt. Jedes Elektron rotiert im klassischen Bild wie ein Kreisel um sich selbst und hat damit einen Eigendrehimpuls oder Spin. Dieser erzeugt ebenfalls ein Magnetfeld. Beide Felder können nun miteinander wechselwirken: Es kommt zur so genannten Spin-Bahn-Kopplung. Diese sorgt dafür, dass die nichtkugelsymmetrischen Orbitale mit identischer Haupt- und Nebenquantenzahl nicht mehr dieselbe Energie haben; ihre Niveaus fächern sich vielmehr auf.

Das Interessante in unserem Zusammenhang ist nun, dass eine klassische Betrachtung für die Spin-Bahn-Kopplung einen Wert liefert, der um den Faktor zwei zu groß ausfällt. Nur mit der relativistischen Dirac-Gleichung erhält man das korrekte Ergebnis.

Die Spin-Bahn-Kopplung verändert die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Materie teilweise grundlegend, und ihre Stärke nimmt ebenfalls mit der Kernladung zu. Allerdings kann sie je nach betrachteter Eigenschaft schon weit oberhalb der sechsten Periode die chemischen und physikalischen Eigenschaften maßgeblich beeinflussen. So verursacht sie eine Aufspaltung bestimmter Spektrallinien im Licht, das ein Atom aussendet, wenn es im elementaren oder gebundenen Zustand in einer Flamme erhitzt wird. Diese schon lange bekannte Feinstruktur zu erklären, war eine große Herausforderung an die frühen Quantentheoretiker. Erfolg hatte aber erst Dirac mit seiner Grundgleichung der relativistischen Quantenmechanik.

Auch in der Praxis spielt die Spin-Bahn-Kopplung auf vielen Gebieten eine wichtige Rolle – so in der Lasertechnologie oder bei so genannten organischen Leuchtdioden, einem entscheidenden Element moderner Flachbildschirme. Große Bedeutung hat sie für alle chemischen und physikalischen Vorgänge, bei denen sich der Elektronenspin umkehrt – wie bei einem Kippkreisel, der sich auf den Kopf stellt. In einem nichtrelativistischen Universum könnten solche Prozesse nicht ablaufen; sie wären verboten, wie die Physiker sagen. Indem die Spin-Bahn-Kopplung die Symmetrie der Orbitale leicht verändert, macht sie die Um- ▷

Die Phosphoreszenz sowie die Bildung von Singulett-Sauerstoff erfordern die Umkehr eines Elektronenspins, die nur dank der Spin-Bahn-Kopplung möglich ist. Zunächst absorbiert ein Farbstoff Strahlung und gelangt dadurch in einen angeregten Zustand. Darin sind wie im Grundzustand alle Elektronenspins (hier nur für die höchsten besetzten Orbitale gezeigt) antiparallel ausgerichtet, weshalb Fachleute von einem Singulett-Zustand sprechen. Durch strahlungsloses »intersystem crossing«, vermittelt durch die Spin-Bahn-Kopplung, erreicht der Farbstoff bei seiner Abregung dann einen Triplett-Zustand, in dem die beiden Spins in die gleiche Richtung zeigen. Von dort kann das Molekül nur durch erneute Spinumkehr bei gleichzeitiger Abgabe eines Lichtquants in den Grundzustand zurückkehren. Das Verbot dieses Vorgangs ist zwar durch die Spin-Bahn-Kopplung gelockert; dennoch findet er sehr langsam statt, was das lange Nachleuchten bei der Phosphoreszenz erklärt. Ist gasförmiger Sauerstoff zugegen, der im Grundzustand bereits zwei parallele Spins enthält, tauscht der Farbstoff mit ihm Spin und Energie, sodass das Gas in einen angeregten Singulett-Zustand übergeht.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Die fotodynamische Therapie von Hautkrebs arbeitet mit Farbstoffen, die sich im Tumor anreichern. Bei Bestrahlung mit intensivem Licht lassen sie dort so genannten Singulett-Sauerstoff entstehen. Das ist eine angeregte, aggressive Form des Gases, die das Krebsgewebe zerstört.



UHR: CLAUS SCHÄFER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; STÜHLE: GERHARD TRAGESER

Im Alltag wichtige Phänomene wie die Phosphoreszenz im Dunkeln leuchtender Zifferblätter oder das Ausbleichen bunter Textilien im Sonnenlicht hängen mit der so genannten Spin-Bahn-Kopplung zusammen, bei der relativistische Effekte ebenfalls eine Rolle spielen.

kehr erst möglich, sodass sie mit einer zwar geringen, aber von null verschiedenen Wahrscheinlichkeit stattfinden kann.

Praktisch wirkt sich das vor allem in der Fotochemie, -physik und -biologie aus. Bei den meisten Substanzen verteilen sich die Elektronen normalerweise paarweise auf die vorhandenen Orbitale, wobei ihre Spins jeweils in die entgegengesetzte Richtung zeigen. Physiker sprechen von Singulett-Zuständen. Diese haben insgesamt kein magnetisches Moment. Es gibt jedoch auch so genannte Triplett-Zustände, in denen zwei Elektronen einzeln separate Orbitale besetzen, während ihre Spins in dieselbe Richtung weisen. Sie sind nur über eine Spinumkehr zu erreichen, die in einer nichtrelativistischen Welt unmöglich wäre.

Warum Farben im Licht verblassen

Triplett-Zustände mischen vor allem bei der Phosphoreszenz mit – einem Phänomen, das in Wissenschaft und Alltag vielseitig genutzt wird; man denke nur an das im Dunkeln nachleuchtende Zifferblatt vieler Uhren. Dabei absorbiert ein organischer Farbstoff Licht und gelangt so von seinem Grund- in einen angeregten Zustand. Auch danach sind zunächst noch alle Elektronen paarweise antiparallel ausgerichtet. Vom angeregten Niveau kann der Farbstoff aber auf Grund der Spin-Bahn-Kopplung durch ein strahlungsloses »intersystem crossing« Energie abgeben und in den etwas tiefer gelegenen Triplett-Zustand mit zwei parallelen Elektronenspins übergehen. Dort bleibt ihm nichts anderes übrig, als unter Aussendung von Licht in den Grundzustand zurückzuspringen. Da dieser Übergang aber eigentlich verboten und nur durch die Spin-Bahn-Kopplung teilweise erlaubt ist, geschieht das sehr langsam, weshalb das schwache Leuchten bis zu mehrere Minuten lang anhält.

Noch weitaus wichtiger als die Phosphoreszenz ist für die Biologie und Medizin eine chemische Konsequenz der gehemmten Spinumkehr. Die Luft auf der Erde enthält etwa zwanzig Prozent Sauerstoff (O). Dieser liegt nicht in Form von Einzelatomen, sondern als O_2-Molekül vor, das eine erstaunliche Besonderheit aufweist: Das Energieniveau, in dem es sich üblicherweise befindet, ist ein Triplett-Zustand. All seine chemischen Reaktionen erfordern deshalb eine Spin-Umkehr und sind folglich gehemmt. Nur dies verhindert, dass sämtliche organischen Stoffe und alle Lebewesen auf der Erde sofort verbrennen.

Stößt ein O_2-Molekül der Luft jedoch mit einem organischen Molekül zusammen, das durch Absorption von Licht in einen Triplett-Zustand angeregt wurde, so kann dieses seine Energie an den Sauerstoff abgeben. Es selbst gelangt dabei in seinen Grundzustand zurück. Das O_2-Molekül dagegen geht in einen angeregten Singulett-Zustand über. In diesem ist es nun hochreaktiv und kann fast jedes organische Molekül zerstören, auf das es trifft.

Singulett-Sauerstoff spielt auf vielen Gebieten eine Rolle. So ist er großenteils für das Ausbleichen von Textilien oder Kunststoffbehältern verantwortlich und trägt zur Schädigung der Haut im Sonnenlicht bei. Gezielt nutzt man ihn dagegen in der fotodynamischen Krebstherapie. Bestimmte organische Farbstoffe reichern sich nach Gabe an einen Patienten bevorzugt in Tumorgewebe an. Bestrahlt man dieses nun mit geeigneten Lampen oder Lasern, so entsteht darin Singulett-Sauerstoff, der es zerstört.

Damit kann man in der Tat feststellen, dass die Spezielle Relativitätstheorie keine realitätsferne Kuriosität ist, die in trockenen Folianten für Spezialisten schlummert, sondern uns im normalen Leben quasi auf Schritt und Tritt begleitet. Wenn wir das nächste Mal die herrliche Farbe eines Goldrings bewundern, sollten wir an Albert Einstein denken, dem wir letztlich – zwar nicht direkt, aber implizit – die Erklärung dafür verdanken. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Martin Kaupp ist Professor für Anorganische Chemie an der Universität Würzburg und leitet die Quantenchemiegruppe am dortigen Institut für Anorganische Chemie. Er hat an der Universität Stuttgart Chemie studiert und 1992 an der Universität Erlangen-Nürnberg promoviert. Danach arbeitete er am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart unter anderem über relativistische Effekte in der Quecksilberchemie. 1994 erhielt er den Heinz-Maier-Leibnitz-Preis und 2001 die Dirac-Medaille der World Association of Theoretically Oriented Chemists (WATOC).

Relativistic electronic structure theory. Von Peter Schwerdtfeger (Hg.). Part 1: Fundamentals. Part 2: Applications. Elsevier, 2002/2005

Relativistic effects in heavy-element chemistry and physics. Von Bernd A. Hess (Hg.). Wiley, 2002

Why is mercury liquid? Or, why do relativistic effects not get into chemistry textbooks? Von Lars J. Norrby in: Journal of Chemical Education, Bd. 68, S. 110, 1991

Relativistic effects in structural chemistry. Von Pekka Pyykkö in: Chemical Reviews, Bd. 88, S. 563, 1988

Relativistic effects on chemical properties. Von Donald R. McKelvey in: Journal of Chemical Education, Bd. 60, S. 112, 1983

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Sprachloser Rundfunk

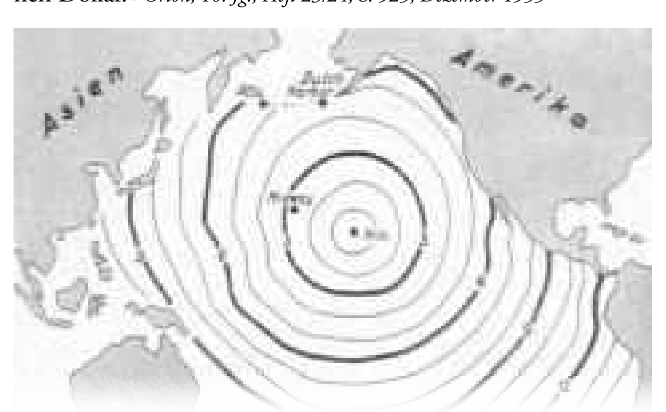
»Das Programm der 3260 US-amerikanischen Rundfunkstationen wird zum größten Teil von der Werbung treibenden Wirtschaft bezahlt und entsprechend gestaltet … Solche Werbeprogramme sind ein Gemisch von Werbedurchsagen und freundlicher Musik. Schon häufig hat der amerikanische Rundfunkhörer sich einen automatischen Schalter gewünscht, der bei Sprachdurchsagen den Empfänger verstummen läßt. Obwohl eine solche Vorrichtung nicht im Sinne der Werbungstreibenden und der Sender ist, hat die Firma Vocatrol einen entsprechenden Zusatz für Rundfunkempfänger gebaut.« *Funkschau, Heft 23, S. 511, Dezember 1955*

Lichtgeschmack bei Milch

»Der Lichtgeschmack entsteht in der Milch nicht nur, wenn sie kurz der Einwirkung von direktem Sonnenlicht ausgesetzt wird, sondern auch, wenn man sie ungeschützt vor normalem diffusem Tageslicht aufbewahrt … Obwohl diese »Milchkrankheit« schon lange bekannt ist, fanden S. Patton und D. V. Josephson erst kürzlich, daß der Gehalt an Methionin und Lactoflavin für das Auftreten des Lichtgeschmacks verantwortlich ist. Gleichzeitig mit seiner Bildung verläuft eine teilweise Zerstörung nicht nur des Lactoflavins, sondern auch von Ascorbinsäure. Methionin dürfte also als Muttersubstanz des Geschmacksstoffs angesehen werden.« *Umschau, 55. Jg., Nr. 23, S. 731, Dezember 1955*

Geburtsstunde der Tsunamiforschung

»Ein schwarzer Tag wurde für Hawaii der 1. April 1946. Damals brach eine Brandungskatastrophe über die idyllischen Inseln herein, unvergeßlich in ihrer Wucht, verheerend in ihren Folgen … Um solche Katastrophen in Zukunft zu verhindern, haben die Amerikaner einen Tsunami-Warndienst aufgebaut … In den acht Jahren, die auf das Unglücksjahr folgten, registrierte der Warndienst im Pazifik fünfzehn Tsunamis. Aber nur ein Auftreten hatte größere Folgen … Sechs Kühe, die vergessen worden waren, ertranken, aber kein Todesopfer war zu beklagen, und der Schaden überschritt dank der Vorsorge nicht einmal 0,8 Millionen Dollar.« *Orion, 10. Jg., Heft 23/24, S. 925, Dezember 1955*



▲ Von Hawaii ausgehende Tsunamiwellen würden in knapp sechs Stunden Nordamerika, in acht Stunden Japan erreichen. Vier Warngeräte im Pazifik sollen künftige Katastrophen verhindern helfen.

Mit dem Fahrstuhl zum Gipfel

»Der Gipfel des 1134 m hohen Bürgenstocks in der Schweiz, von dem man einen prächtigen Fernblick auf den Vierwaldstättersee und dessen malerische Ufer genießt, war bisher nur durch einen schmalen und steilen Fußpfad von den Hotels aus zugänglich, die am Fuße der fast senkrecht emporragenden Hammetschwand gelegen sind … Um nun den Aufstieg zu diesem bevorzugten Aussichtspunkt für alle Touristen und Sommergäste der Hotels zu erleichtern, ließ der Besitzer der letzteren vom Endpunkt der Bürgenstockbahn … einen sanften Fußweg auf der äußeren, dem See zugewendeten Seite der Hammetschwand bis unter deren höchsten Punkt anlegen und hier einen elektrisch betriebenen Aufzug herstellen.« *Für Jedermann, Nr. 12, S. 185, Dezember 1905*



◀ Der Aufzug bringt den Besucher in drei Minuten auf die Aussichtsplattform über dem Vierwaldstättersee.

Ultramikroskopisches Gold



»Der Miterfinder des Ultramikroskops, Dr. Richard Zsigmondy hat nun eine Reihe wertvoller Untersuchungen mit seinem neuen Instrument angestellt und dieselben in einer trefflichen Schrift ›Zur Erkenntnis der Kolloide‹ veröffentlicht … Metalle und sonstige unlösliche Körper lassen sich so fein in einer anderen Flüssigkeit verteilen, dass sie wie eine Lösung erscheinen: anorganische kolloidale Lösungen. Eine solche, nämlich kolloidales Gold, hat Zsigmondy besonders eingehend mit dem Ultramikroskop untersucht und gefunden, dass das Gold in solchen »Lösungen« in ganz verschieden grossen Teilchen enthalten, suspendiert ist.« *Die Umschau, 9. Jg., Nr. 50, Dezember 1905*

Farbe gegen Kleidermotten?

»Die neueste Untersuchung über Kleidermotten ist von M.L. Sitowski angestellt worden … Die meisten Farbstoffe erwiesen sich als unschädlich für die Raupen … Das gibt einen Hinweis, in welcher Richtung die Farbstoffindustrie neue Wege betreten könnte, indem sie nämlich Farben erzeugt, welche die damit gefärbte Wolle für Mottenraupen ungenießbar macht. Ebenso widerstanden sie einer mehrere Minuten wirkenden Chloroformierung, und auch Formalindämpfe, die man eine halbe Stunde einwirken ließ, waren ohne sichtbaren Einfluß auf die Tiere.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 299, S. 599, Dezember 1905*

WISSENSCHAFT IM RÜCKBLICK

UMWELT

UNEP (Hg.)

One Planet, Many People

Atlas of Our Changing Environment

United Nations Environment Programme (UNEP), Division of Early Warning and Assessment (DEWA), Nairobi (Kenia) und Sioux Falls (USA). Vertrieb: SMI, Hertfordshire (England), www.earthprint.com. 320 Seiten, $ 150,–



Seid fruchtbar und mehret euch und füllet die Erde und machet sie euch untertan.« Nie war die Menschheit diesem biblischen Ziel (1. Mose 1, Vers 28) näher als heute: Von den Polen bis zum Äquator, von den Wüsten bis in den Regenwald trägt die Erde die Spuren menschlichen Umgestaltungsdrangs.

Diese Entwicklung wird – meist zu Recht – von vielen Naturschützern und Ökologen beklagt; aber immer noch betrachten viele Politiker und Wirtschaftslenker die Wildnis als reine Landreserve, die es ergiebigerer Nutzung zuzuführen gelte. Dabei steht mit dem Verlust funktionierender Ökosysteme einiges auf dem Spiel: Die Artenvielfalt ist bedroht, maßlose Ausbeutung erschöpft einst reichhaltige Fischgründe, fortschreitende Verwüstung am Aralsee, am Toten Meer und in Teilen Afrikas gefährdet die wirtschaftliche und gesundheitliche Basis der ortsansässigen Menschen.

Von all diesen Eingriffen berichtet der opulent aufgemachte Atlas »One Planet, Many People« vom Umweltprogramm UNEP der Vereinten Nationen, der unter anderem in Zusammenarbeit mit der Nasa entstanden ist. Kernstück des Buchs sind meist ganzseitige, vergleichende Satellitenbildaufnahmen aus allen Ecken unseres Globus. Viele der früheren Bilder stammen aus den 1970er und 1980er Jahren, als auf der Welt erst ungefähr vier Milliarden Menschen lebten und der Begriff »Globalisierung« noch nicht einmal erfunden war. Den unberührten Wäldern, ausgedehnten Feuchtgebieten und stabilen Gletschern von damals werden als krasser Kontrast Aufnahmen des gleichen Gebiets zwanzig Jahre später gegenübergestellt: dichte Straßennetze und Kahlschläge, ausufernde Städte und schrumpfende Seen, gestaute Flüsse und tauendes Eis.

In der Einleitung, die sich der Geschichte der Erde und der Evolution der Menschheit widmet, erfährt man, dass *Homo sapiens* bereits während der Stein- und Eisenzeit vielfach Einfluss auf seine Umwelt genommen hat – durch Jagd, Rodungen oder erste Metallverhüttung.

Aus dem Assuan-Stausee fließt Wasser durch Betonkanäle in die Toschka-Senke und hat dort neue Seen entstehen lassen. Durch das Projekt soll sich die landwirtschaftliche Nutzfläche Ägyptens in 15 Jahren verdoppeln.





Besonders beeindruckt hat mich in diesem Abschnitt eine spezielle Zahl: Die verfügbare Biosphärenfläche pro Mensch ist innerhalb eines einzigen Jahrhunderts, des letzten, auf ein Viertel zusammengeschrumpft, und zwar ausschließlich wegen des Bevölkerungswachstums.

Das erste Großkapitel »People and Planet – Human Influences on the Planet« beschreibt detailreich die Entwicklung der Weltbevölkerung und ihrer Kulturen, die Landnutzung und -verschlechterung, die Ökosysteme und ihre Artenvielfalt sowie Energieerzeugung und -verbrauch. Eine Vielzahl an Tabellen, Grafiken und Karten erläutert dies anschaulich und in meist hoher Qualität – etwa die Weltkarte der Bevölkerungsdichte, auf der die von Milliarden bevölkerten Regionen Indien und Ostasien in deutlichem Rot erscheinen, während das dünn besiedelte Australien sehr blass wirkt. Hier erfährt der Leser auch, dass nicht nur Tiere oder Pflanzen aussterben, sondern auch Sprachen und Kulturen. Im Abschnitt »Energie« folgen die ersten Satellitenbildvergleiche, die zeigen, wie sich beispielsweise Tagebaue fortschreitend durch die Landschaft fressen können.

Derartige Veränderungen und Zerstörungen werden noch viel ausführlicher im Kapitel »Human Impacts on the Planet« vorgestellt: Ozonloch und Klimawandel finden ebenso ausführliche Erwähnung wie Küstenerosion, tote Meereszonen, die grassierende Abholzung von Mangroven- und anderen Wäldern, Dammbauten, Verstädterung und die expansive Landwirtschaft.

Die Darstellung ist sehr aktuell; so zeigt eine der Abbildungen die extremen Abweichungen der Temperaturen im so genannten Jahrhundertsommer 2003, eine andere die toten Flächen vor der Küste im Süden der USA 2004. Zahlreiche Fallbeispiele stellen ausgewählte regionale Umweltprobleme etwas genauer vor. Noch beeindruckender sind die zahlreichen Satellitenbildvergleiche – etwa die beiden Bilder vom Tschadsee, der von einem riesigen Binnengewässer zu einem kümmerlichen Schlammbecken verkommen ist, oder die von der Waldvernichtung aus allen Ecken der Welt.

Das letzte Kapitel handelt von natürlichen und menschengemachten Katastrophen: Vulkanausbrüche, Erdbeben, Meteoriteneinschläge, der Reaktorunfall von Tschernobyl bis hin zum Seebeben und seinem Tsunami von Weihnachten 2004. Wie jedes Kapitel ist auch dieses mit zahllosen Karten und Bildern illustriert und mit einem ausführlichen Quellenverzeichnis zum vertiefenden Studium versehen.

Der Atlas »One Planet, Many People« ist ein durch und durch gelungenes Werk, das den zunehmenden – und zunehmend schädlichen – Einfluss des Menschen auf die Erde überzeugend darstellt. Das Gesamtbild ist unvermeidlich düster, allerdings rein technisch gesehen von exzellenter Qualität: Die aktuellen Satellitenbilder, die so gar nichts mehr mit den pixeligen und unscharfen Aufnahmen von 1980 gemein haben, zeigen, dass es zumindest in der Technik auch Entwicklungen zum Guten gibt.

Daniel Lingenhöhl

Der Rezensent ist promovierter Geograf und freier Wissenschaftsjournalist in Düsseldorf.

ZEITGESCHICHTE

Rainer Karlsch

Hitlers Bombe

Die geheime Geschichte der deutschen Kernwaffenversuche

Deutsche Verlags-Anstalt, München 2005. 432 Seiten, € 24,90



Wie nahe waren die Deutschen im Zweiten Weltkrieg dem Bau einer Atombombe gekommen?

Bisher war man davon ausgegangen, dass die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Nutzung der Kernspaltung im Wesentlichen von dem so genannten Uranverein um Werner Heisenberg betrieben wurden und sich fast ausschließlich auf den Bau eines Reaktors konzentrierten. Diese Sichtweise geht nicht zuletzt auf eine Legende zurück, die Carl Friedrich von Weizsäcker während der Internierung in Farm Hall im Sommer 1945 formulierte, dass nämlich »die friedliche Entwicklung der Uranmaschine in Deutschland unter dem Hitler-Regime statt[fand], während die Amerikaner und die Engländer diese grässlichen Kriegswaffen entwickelten«.

Der Berliner Historiker Rainer Karlsch belegt nun auf der Grundlage ausgiebiger Detailforschungen, dass dieses Bild höchst unvollkommen und einseitig ist. Deutsche Wissenschaftler und Techniker haben an der waffentechnischen Nutzung der Urankernspaltung sehr viel intensiver gearbeitet, als sie selbst bisher zugegeben oder andere herausgefunden haben. So hat Karlsch in russischen Archiven ein Patent Carl Friedrich von Weizsäckers vom Sommer 1941 über die Nutzung von Plutonium als Kernsprengstoff ausfindig gemacht.

Der Autor konzentriert sich weniger auf den Uranverein als vielmehr auf die Gruppe des Heereswaffenamts um Kurt Diebner; auch erfährt man im Buch erstmals Näheres über Parallelforschungen der Marine und der SS. Seine Ergebnisse basieren nicht zuletzt auf umfangreichem Material aus Moskauer Archiven, das die Rote Armee nach 1945 dorthin verbracht hatte. Darüber hinaus wurden durch ihn bislang unzugängliche Privatnachlässe und Spionageberichte erschlossen. Alles in allem also ein gut recherchiertes Buch, das auch ohne das Spektakulum Atombombe interessant und wichtig wäre.

Das Problem des Buchs liegt darin, dass der Inhalt das Versprechen des Titels nicht einlöst. An keiner Stelle gibt es eine klare und verständliche Beschreibung einer »taktischen Atomwaffe«, einer »Uran-235-Bombe« oder einer »thermonuklearen Hohlladungsbombe«, Konzepte, die nach seiner Darstellung zumindest intensiv diskutiert wurden. Die Erklärungen bleiben im Qualitativen und Prinzipiellen stecken, sämtliche konkrete Daten und Berechnungen fehlen.

Insbesondere bleibt unklar, wie die »thermonukleare Hohlladungsbombe« hätte funktionieren sollen. Nach dem damaligen wie dem heutigen Stand der Physik ist es faktisch unmöglich, auf chemischen Weg und mittels konventioneller Methoden die Bedingungen für eine Fusionsreaktion zu erreichen. Auch wird nirgendwo im Buch zweifelsfrei beantwortet, wo in Deutschland das für eine Atombombe nötige Plutonium oder angereichertes Uran produziert wurde. Auch Karlschs (sehr wahrscheinlich zutreffende) Hypothese, Diebners Reaktoranordnung in Gottow sei für kurze Zeit ▷



Rüstungsminister Albert Speer (1905–1981) und Generalfeldmarschall Erhard Milch (1892–1972) waren bereit, Heisenbergs Forschungen an der »Uranmaschine« mit viel Geld zu unterstützen. Allem Anschein nach hat Heisenberg davon keinen Gebrauch gemacht.

kritisch gewesen, ist interessant und für sich genommen sogar sensationell. Doch hilft sie hier wenig, denn nennenswerte Mengen an Plutonium konnten so sicherlich nicht erzeugt werden.

Gleichwohl ist eine der zentralen Thesen des Buchs, es habe in Deutschland mindestens zwei nukleare Testexplosionen gegeben: im Oktober 1944 auf der Insel Rügen und im März 1945 nahe dem thüringischen Ohrdruf. Für den Test auf Rügen ist allerdings der zitierte Kronzeuge, ein italienischer Kriegsberichterstatter, alles andere als eine seriöse Quelle. Der Test in Thüringen ist besser belegt, doch auch hier zeigen die vorliegenden Quellen und Zeitzeugen eigentlich nur, dass dort im März ein Waffentest stattfand, bei dem es große Zerstörungen und Hunderte von Toten unter den Häftlingen eines Konzentrationslagers gegeben hat. Ob es sich dabei tatsächlich um eine Nuklearwaffe oder »nur« um eine neuartige konventionelle Waffe handelte, dafür fehlt nach wie vor der letzte, überzeugende Beweis. Karlsch versucht diesen mit der Analyse von Bodenproben zu erbringen, doch auch diese sind bislang alles andere als eindeutig.

Der Autor behauptet – was der marketinggerechte Buchtitel und die reißerische Verlagsankündigung deutlich herausstellen –, dass deutsche Physiker und Techniker für Hitler eine Atombombe gebaut und auch mehrmals erfolgreich getestet hätten. Eine solche kühne These, welche die Ergebnisse der bisherigen Forschung auf den Kopf stellen würde, bedarf überzeugender Beweise. Von Letzteren ist Karlsch aber noch weit entfernt, denn die von ihm mit viel Fleiß zusammengetragenen Indizien sind zwar interessant, doch häufig allzu vage und wenig belastbar. So liefert das Buch eine Fülle neuer und wichtiger Informationen zur Atomforschung im Dritten Reich, doch wenig über die deutsche Atombombe. Die gab es schlichtweg nicht.

Entgegen der Verlagsankündigung muss die Geschichte der Uranforschung im Dritten Reich nicht neu geschrieben werden – aber unter dem Eindruck von Karlschs Forschungsergebnissen sehr wohl präzisiert und fortgeschrieben. Dabei sollten auch gleich die neuen Legenden, denen nicht zuletzt das vorliegende Buch Vorschub leistet, in den Orkus der Wissenschaftsgeschichte wandern.

Dieter Hoffmann und Albert Presas i Puig

Die Rezensenten sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin.

PSYCHOLOGIE

Jens Uwe Martens und Julius Kuhl

Die Kunst der Selbstmotivierung

Neue Erkenntnisse der Motivationsforschung praktisch nutzen

2., erweiterte und aktualisierte Auflage.
Kohlhammer, Stuttgart 2005. 177 Seiten, € 23,–

Wolfgang Seidel

Emotionale Kompetenz

Gehirnforschung und Lebenskunst

Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München 2004. 400 Seiten, € 30,–



Der Markt ist reicher um zwei Bücher, die den Weg hin zu mehr Lebensqualität ebnen. Geschehen soll dies durch den bewussten Einsatz und die bewusste Wahrnehmung von Emotionen.

Was haben Stephen Hawking und Joschka Fischer gemeinsam? Sie sind Gestalter, sie nehmen ihr Schicksal selbst in die Hand und haben gegen widrige Umstände mit Hilfe von moderner Technik beziehungsweise Jogging zu sich selbst gefunden. Jens Uwe Martens und Julius Kuhl zeigen in »Die Kunst der Selbstmotivierung«, worin sich Opfer- und Gestaltertypen unterscheiden. Dabei machen sie nicht an dem manchmal etwas starren Konzept der Persönlichkeit halt. Es komme nicht darauf an, was man durch seine Persönlichkeit mitbringt, sondern ob man seine Gefühle so weit zu regulieren vermag, dass verschiedene Motivationslagen entstehen können. So tut dem stets wohlgelaunten Optimisten auch mal eine gedämpftere Stimmung gut, da er sonst in impulsiv-routiniertem Verhalten hängen bleibt und neue Probleme möglicherweise ungelöst bleiben.

Das Buch basiert auf der Idee der persönlichen Intelligenz. Gemeint ist die Fähigkeit, differenziert durch Erfahrung zu lernen und im Rahmen der eigenen Persönlichkeit sein Verhaltensrepertoire zu erweitern.

Martens ist Diplompsychologe und Leiter eines Trainingsinstituts für Führungskräfte in München, Kuhl hat den Lehrstuhl für Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung an der Universität Osnabrück. Der Anwender und der Wissenschaftler haben zu einer außerordentlich geglückten Zusammenarbeit gefunden. Sie nehmen sich Zeit, die psychologischen Grundlagen detailliert und verständlich zu erklären und den Bezug zur Anwendung deutlich zu machen. Sie gehen über ein oberflächliches Nacherzählen psychologischer Phänomene weit hinaus, indem sie die theoretischen und empirischen Grundlagen

in einer anwendungsorientierten Literaturschau würdigen. Obendrein steckt hinter den Maßnahmen- und Handlungsvorschlägen eine neue Theorie von Kuhl und damit eine zum Teil auch empirisch untermauerte Begründung. Kleine Anekdoten, selbst erlebte Geschichten und Beispiele, die sich illustrativ in Trainings verwenden lassen, lockern die Darstellung auf.

Dagegen ist »Emotionale Kompetenz« eine Art Lehrbuch für den Hausgebrauch, mit dem hoch gesteckten Ziel, dem Leser zum »Ablegen von schlechten Angewohnheiten oder lästigen Eigenarten …, vielleicht sogar von deutlichen Charakterfehlern« (Vorwort) zu verhelfen. Wolfgang Seidel, emeritierter Chefarzt für Allgemeinchirurgie am Lehrkrankenhaus der Universität Tübingen und freier Mitarbeiter im Managementtraining, breitet vor dem Leser einen bunten Strauß aus Gehirnforschung, Psychologie und Philosophie aus.

Im ersten Teil geht es hauptsächlich darum, wie Emotionen unsere Einstellungen, Entscheidungen, unser Verhalten und unsere Leistung beeinflussen. Der zweite Teil widmet sich vor allem der Kommunikation und der Frage danach, wie sie optimiert werden kann. Kapitelthemen wie Empathie, Sympathie, emotionale Intelligenz und Menschenkenntnis, die Anwendungsfelder Familie, Freundeskreis und – vor allem – berufliche Umwelt, Ziele wie Führungskompetenz, Teamfähigkeit und Konfliktmanagement zeigen die große thematische Breite des Werks.

Die vielen wohlbebilderten Kästen mit wissenschaftlichem Hintergrund lassen einen die betuliche Art Seidels verzeihen: Am Ende jedes Kapitels hält er den Leser an innezuhalten und über sein eigenes Leben nachzudenken. Es folgen eine halbseitige Kurzzusammenfassung des Kapitels und eine Seite mit Ratschlägen und Denkanstößen, die zweifellos gut und auch noch wissenschaftlich begründet sind. So ist die Empfehlung, sich nach erledigter Arbeit über die Resultate zu freuen oder Emotionen gezielt einzusetzen, um andere Menschen zu überzeugen, sicher aller Ehren wert. Die Umsetzung des guten Rats in die Tat hat der Empfänger jedoch selbst zu leisten; es handelt sich also eher um Denkanstöße, nicht um Patentrezepte oder Schritt-für-Schritt-Anleitungen. Erfreulicherweise hat Seidel unter »Weiter- ▷

▷ führende Literatur« die von ihm empfohlenen Bücher mit Kurzrezensionen versehen.

Das Buch eignet sich nicht nur für den Vorsatz »Ich lese es im Urlaub und verändere mein Leben«, sondern auch zum Schmökern und gemütlichen Nachdenken am Feierabend. Es macht sich auf dem Nachttisch ebenso gut wie in der Aktentasche.

Beide Bücher bestechen durch verständliche und kurzweilige Experimentberichte, Praxisbeispiele, lehrreiche Anekdoten und Merkbeispiele sowie persönliche Erfahrungen. Beide finden sich im Handel in der Rubrik »Ratgeber, Selbsthilfe«, müssten aber eigentlich im Regal ein ganzes Stück in Richtung Fachliteratur rücken. Martens und Kuhl gehen eher in die Tiefe, Seidel in die Breite. Beiden gemeinsam ist, dass sie ohne Scheu den ganzen Weg von wissenschaftlichen Grundlagenbefunden bis hin zu konkreten Handlungsrichtlinien gehen.

Ob man im Beruf erfolgreicher sein oder im Privatleben neue Freunde kennen lernen möchte: Selbstmotivierung und emotionale Kompetenz sind in allen Teilen des Lebens immer wieder gefragt. Und denken Sie daran: Der nächste Neujahrsmorgen kommt bestimmt!

Cornelia Betsch

Die Rezensentin ist Diplompsychologin und promoviert an der Universität Heidelberg über individuelle Präferenzen für intuitive und analytische Entscheidungsstrategien.



NEUROWISSENSCHAFTEN

Tom Stafford und Matt Webb

Mind Hacks

Tips & Tools for Using Your Brain

O'Reilly, Sebastopol (California) 2005. 396 Seiten, $ 24,95

Das Buch gehört in eine Reihe mit »eBay Hacks«, »Google Hacks« und »Mac OS X Hacks« aus demselben Verlag: Anleitungen, ein System etwas anders zu nutzen, als sein Anbieter das vorgesehen hat. Und doch fällt es aus dem Rahmen. Kein Computer oder Betriebssystem wird gehackt, sondern das Gehirn. Wie die anderen »Hack«-Bücher ist es nicht als Sachbuch im herkömmlichen Sinn angelegt, sondern als Sammlung von hundert Experimenten, »Hacks«, aus zehn verschiedenen Bereichen. Gezeigt werden erstaunliche Selbstversuche, unter anderem zum visuellen System, zu Aufmerksamkeitssteuerung, Hören und Sprache, Bewegung, Erinnerung, Schlussfolgerung und Gestaltwahrnehmung.

Jedes neurologische Phänomen wird zunächst allgemein erläutert; es folgen die Beschreibung eines zugehörigen Experiments und eine kurze Erklärung sowie Angaben zu weiterführenden Texten und Internetlinks. Tom Stafford, Psychologe an der Universität Sheffield (England), und Matt Webb, Ingenieur, Designer und freischaffender Autor, unter anderem für die BBC, wurden von Spezialisten auf dem jeweiligen Gebiet unterstützt.

Die einst beliebte Metapher vom Gehirn als Computer ist in der ursprünglichen Form nicht mehr haltbar, wie auch die Autoren im Vorwort einräumen. Dafür haben sich in den letzten Jahrzehnten zu viele und wesentliche Differenzen offenbart, etwa was Speicherung und Verarbeitung von Informationen angeht. Dennoch gibt es hinreichend viele Parallelen, um die Verwendung des Begriffs »Hack« zu rechtfertigen.

Natürlich sind »Mind Hacks« keine Schwachstellen oder geheimen Kniffe, mit denen man eine vom »Entwickler« so nicht beabsichtigte Funktion des Gehirns freischalten könnte. Es gibt ja auch keinen Systemadministrator, bei dem man sich über die Fehlprogrammierung beschweren könnte – zumindest zu Lebzeiten nicht. Vielmehr offenbaren die Hacks die buchstäblich eigenwillige Funktionsweise des Gehirns: neuronal festgelegte Annahmen über die Umwelt, die dem »Ich« ihrer Natur nach so nah sind, dass sie nicht bewusst werden, wie eine Brille, die man nicht mehr wahrnimmt. In diesem Sinn sind wir meist Gefangene der Struktur unseres neuronalen Netzes.

Stafford und Webb räumen mit der Vorstellung auf, man nutze nur zehn Prozent des Gehirns (Hack #6), und erklären viele alltägliche Phänomene, etwa, warum man sich nicht selbst kitzeln kann (Hack #65), warum man trotz schlechter Verbindung am Telefon immer noch die vertraute Stimme eines Freundes erkennen kann (Hack #33) oder warum der Klang von Worten neben dem Inhalt auch Bedeutung, etwa zur Form des bezeichneten Gegenstandes, vermittelt (Hack #50). Interessant auch Hack #67. Dort wird beschrieben, dass Gegenstände förmlich danach verlangen, auf eine bestimmte Art und Wei-





▲ **Eines der beiden Gesichter scheint männlich zu sein, das andere weiblich. Deckt man die linke Hälfte beider Gesichter mit einem Stück Papier zu, so verkehrt sich diese Zuweisung in ihr Gegenteil! Warum? Für die Wahrnehmung – zum Beispiel – des Geschlechts dominiert die rechte Hirnhälfte. Die aber verarbeitet vorrangig Informationen aus der linken Hälfte des Gesichtsfeldes. Beide Bilder sind zusammengesetzt: aus einer männlichen linken und einer weiblichen rechten Gesichtshälfte, und umgekehrt.**

se benutzt zu werden. Bereits durch die Form des Griffs sagt die Tür, dass sie gedrückt werden will; jedenfalls neigen die Leute dazu, das zu tun, auch wenn »Ziehen« draufsteht. Eine Notausgangstür sollte solche Missverständnisse besser nicht aufkommen lassen.

Hack #99 schließlich weist auf die Bedeutung von verbaler Psychohygiene hin. Versuchspersonen, die Texte lasen, in die negative Begriffe eingeflochten waren, agierten anschließend in einer sozialen Versuchssituation deutlich aggressiver. Vielleicht gilt ja auch der Umkehrschluss, und Sie sollten dieses Buch entspannt im Sonnenschein auf einer Blumenwiese oder unter einem Regenbogen lesen, denn es birgt echte Schätze.

Ein kurzweiliges Buch, das nicht in einem Zug gelesen werden muss und das zum Nachdenken über das Selbstverständnis des Lesers einlädt. Die vielen einfachen Experimente, die auf Alltagserfahrungen aufbauen, sorgen auch auf einer Party für Erstaunen, Belustigung und Gespräche jenseits des üblichen Smalltalks.

Indem man auf der Verlags-Website www.oreilly.com auf »Safari book-shelf« klickt, kann man das Buch probeweise im Internet lesen.

Marco Jäger

Der Rezensent hat Philosophie, Psychologie und Informatik studiert und arbeitet als Online-Redakteur bei www.wasistwas.de.

RÄTSELHAFTES

Olaf Fritsche, Richard Mischak und Thorsten Krome

Jagd auf Zahlen und Figuren

Mathematische Knobelgeschichten von Wissenschaft Online

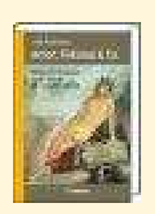
Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2005. 157 Seiten, € 8,90

Seit Mai 1998 veröffentlicht das Internetportal Wissenschaft Online Monat für Monat eine mathematische Knobelei (die inzwischen Bestandteil der Internet-Zeitschrift »spektrumdirekt« ist). Die drei Autoren, der Biologe und Wissenschaftsjournalist Olaf Fritsche, der Mathematiker und Unternehmensberater Richard Mischak sowie der Physiker und Wissenschaftsjournalist Thorsten Krome, haben nun 31 dieser Rätsel zu einem Buch zusammengestellt.

Die Knobeleien sind etwas völlig anderes als die oft staubtrockenen Mathematikaufgaben aus Schulbüchern, denn sie sind immer in humorvolle und oft auch skurrile Geschichten gekleidet, die selbst eingefleischte Mathematikmuffel gerne lesen. »Eigentlich weiß ich mit Mathe nicht viel anzufangen und wollte nur die Geschichte lesen. Aber dann dachte ich, das kann doch nicht so schwer sein, und habe ein bisschen rumprobiert. Vielleicht stimmt meine Lösung sogar«, schrieb ein Leser den Autoren. Vielen wird es ähnlich ergangen sein.

In den Geschichten trifft man eine Menge alter Bekannter aus Märchen und ▷





MEDIZINGESCHICHTE

Axel Karenberg

Amor, Äskulap & Co.

Klassische Mythologie in der Sprache der modernen Medizin

Schattauer, Stuttgart 2004. 204 Seiten, € 29,95

War Caesar wirklich das erste Kind, das per Kaiserschnitt *(Sectio caesarea)* das Licht der Welt erblickte? Hätte König Ödipus psychologische Betreuung benötigt? Und was war so besonders an Achilles' Ferse?

Dass viele legendäre Helden und sagenhafte Ungeheuer in der Medizinterminologie ein zweites Zuhause gefunden haben, gehört oft zum Allgemeinwissen. Doch dass sich hinter anderen, unscheinbaren Fachtermini ebenfalls mythische, literarische und sogar historische Gestalten verbergen, sorgt für so manches Ahaerlebnis.

So stammt die Bezeichnung Panik, die eigentlich ein Massenphänomen beschreibt, vom bockfüßigen Gott Pan ab: Wurde er beim Schlafen gestört, ließ er seinem Unmut freien Lauf und schreckte dabei ganze Tierherden auf. Auch ein Charakter eines Versepos aus dem Jahr 1530 machte sich in der Medizin einen Namen: Aus Zorn über eine Dürre verfluchte der Schweinehirt Syphilus den Sonnengott – und wurde sogleich mit einer Krankheit dafür bestraft, die heute Syphilis heißt.

Warum und über welche Umwege Krankheiten und abnorme Verhaltensweisen zu ihren außergewöhnlichen Namenspatronen kamen, das erklärt Axel Karenberg vom Institut für Geschichte und Ethik der Medizin in Köln so kurzweilig, dass es ihm ganz nebenbei auch noch gelingt, die Erinnerung der Leser an die klassischen Sagen des Altertums aufzufrischen.

Eva Hörschgen

Die Rezensentin hat Archäologie und Ethnologie studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Heinz Knieriemen, Paul S. Pfyl

Kosmetik-Inhaltsstoffe von A bis Z

AT, Baden (Schweiz) 2005, 253 Seiten, € 9,95

Sich in seiner Haut wohl fühlen möchte jeder. Den äußeren Part sollen Tausende von Kosmetikprodukten übernehmen. Was genau in den Tuben, Dosen und Flakons mit den klangvollen Namen steckt, bleibt jedoch oft ein Rätsel.

Die Autoren listen die einzelnen Inhaltsstoffe alphabetisch auf und erklären sie. Eine farbliche Markierung macht es einfach, ihren Risikograd und die Hautverträglichkeit abzuschätzen: Schwarz sind die ungefährlichen Substanzen markiert, gesundheitlich bedenkliche Stoffe tragen rote Farbe.

Der kritische Ratgeber will nicht die Freude an einem Umgang mit pflegender und dekorativer Kosmetik nehmen, sondern ihn durch Aufklärung und Aufzeigen von Alternativen unbeschwert machen. Insgesamt ein sehr praktisches Nachschlagewerk, in dem zahlreiche Fakten angenehm informativ verpackt sind.

Aus der Rezension von Bettina Pabel

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■
Vermittlung	■■
Verständlichkeit	■■■■
Lesespaß	■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	19

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/rezensionen**

▷ Romanen, aus Film und Fernsehen und ihre Verwandtschaft wieder. Da löst Hans Christian Andersen gemeinsam mit dem Däumling und dem neu gekleideten Kaiser Rätsel, und der Yeti-Ritter Obi Vondadrobi berechnet Kugelradien. KGB (Knobelei-Geheim-Bund), CIA (Computer im Alltag) und FBI (Federal Bureau of the Impossible) beschäftigen sich mit Mathematik. Ali Lager kämpft mit vierzig Regalen, und Indiana Johanna ist auf einem schwankenden Goldfloß unterwegs.

Hier ist eine Kostprobe: Auf Schloss Hochwärts entdecken Harald Pottkowski, Rob Wieslie und Herjemineh ein kicherndes Buch. »Löst das Rätsel des Kaminsims«, lesen sie. Dicht an dicht stehen dort acht altrömische Rechensteine mit den eingravierten Ziffern von 1 bis 8 in der Reihenfolge 8, 4, 2, 7, 1, 5, 3, 6. Sie nehmen den ganzen Sims ein, weder links noch rechts oder zwischen ihnen ist Platz. »Wenn es euch gelingt, die Steine mit der geringst möglichen Zahl von Zügen neu zu ordnen, sodass sie in aufsteigender Reihe von 1 bis 8 stehen, wird der Kamin sich seitlich verschieben und einen Geheimgang freigeben. Für jeden Zug dürft ihr nur jeweils einen Stein vom Sims nehmen und beliebig viele von den stehen gebliebenen Steinen verschieben, bevor ihr den Rechenstein an seinen neuen Platz stellt.«

Ein großer Teil der Aufgaben sind geometrische Probleme, andere kommen aus der Arithmetik, der Kombinatorik und der Wahrscheinlichkeitsrechnung. Viele, aber lange nicht alle sind mit Mittelstufenmathematik zu bewältigen. So ist bei der Aufgabe »Das Geheimnis der Pyramiden« ein Extremwertproblem mit Hilfe der Differenzialrechnung zu lösen.

Es ist ein Genuss, dieses Buch zu lesen und seine Rätsel zu knacken. Ebenso wie sein Nachfolger »Auf der Suche nach dem heiligen Integral« sollte es in keiner Sammlung von Denksportaufgabenbüchern fehlen.

Heinrich Hemme

Der Rezensent ist Professor für Physik an der Fachhochschule Aachen.

Pendelverkehr durch die Erde (II)

Könnte man im Erdinneren in Tunneln ohne Schienen auf Ellipsen fahren? Und wie erzeugt man ein exakt homogenes Schwerefeld?

Von Norbert Treitz

Wenn die Erde durch den Mittelpunkt hindurch durchbohrt wäre, [würde] eine durch diesen Schacht hindurch sich bewegende Kanonenkugel im Mittelpunkte eine solche Geschwindigkeit erlangen, dass sie … über den Mittelpunkt hinaus eine ebenso große Strecke aufwärts getrieben würde, als sie vorher gefallen ist; dabei würde die Geschwindigkeit jenseits des Centrums um die nämlichen Beträge abnehmen, um welche sie beim Absteigen zugenommen hat …

Galileo Galilei

Dialog über die Weltsysteme

Wenn die Erde im Inneren nicht so heiß und flüssig wäre, könnte man vielleicht einen Tunnel mitten hindurch bohren und eine Untergrundbahn im Wortsinne durchfallen lassen. Wenn darüber hinaus die Massenverteilung im Erdinneren homogen wäre, ließe sich die Bewegung unserer Bahn mit relativ einfachen Mitteln berechnen. Unter anderem ergibt sich, dass jede Fahrt zwischen zwei Punkten der Oberfläche, einerlei ob sie einander gegenüberliegen oder vielleicht nur ein Zehntel des Erdumfangs voneinander entfernt sind, dieselbe Zeit in Anspruch nimmt: ungefähr 42 Minuten. Dieser verblüffende Sachverhalt ist im Lauf der Geschichte immer wieder entdeckt worden. Dank an Hans Bieri aus Schinznach (Schweiz) für den Hinweis auf Galilei!

Die in der letzten Folge dieser Rubrik (November 2005) eingeführte Idee soll diesmal ausgebaut und verfeinert werden.

Bislang fahren unsere Bahnen geradlinig, das heißt entlang von Sehnen durch die Kugel. Wenn der Tunnel nicht genau durch den Erdmittelpunkt verläuft, benötigt die Bahn Schienen, denn die Gravitation der Erde wirkt nicht nur als Antrieb und Bremse für unsere Bahn, sondern zieht sie, wenn auch mit verminderter Kraft, gegen die »innere« Tunnelwand.

Auf der Erdoberfläche ist der freie Fall senkrecht nach unten nicht die einzige antriebslose Bewegung, die nicht durch Zwangskräfte geführt werden muss; es gibt ja Wurfparabeln. Gibt es so etwas – Bahnen ohne Schienen – auch im Erdinneren? Wir stellen uns vor, dass für jede jetzt zu diskutierende Bahn ein geeigneter Tunnel bereitgestellt wird, der aber die Dichte des Planeteninneren nicht merklich vermindern soll.

In der letzten Folge haben wir errechnet, dass die Erde im Inneren das Kraftfeld eines kugelsymmetrischen harmonischen Oszillators hat: Die Kraft ist auf den Mittelpunkt zu gerichtet und proportional zur Entfernung von demselben. Wir schicken einen Massenpunkt an einem bestimmten Punkt mit einer gewissen Geschwindigkeit auf die Reise und wollen wissen, wie er sich bewegen wird.

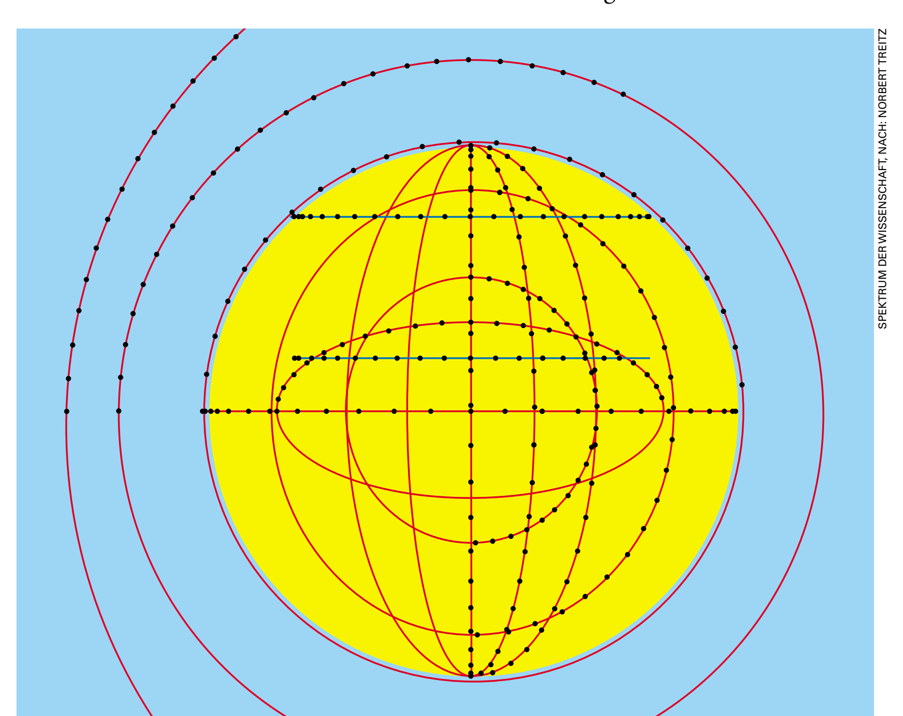
Die Kugelsymmetrie verhilft zu einer schnellen Antwort: Zusammen mit dem Erdmittelpunkt S legen beide Startparameter eine Ebene fest. In ihr muss unsere Bahn liegen, denn dank der Kugelsymmetrie ist die ganze Anordnung insbesondere spiegelsymmetrisch bezüglich der Ebene, woraus folgt, dass die Bahn die Ebene nicht verlassen kann. Legen wir das Koordinatensystem so, dass die Bahnebene die x-y-Ebene ist. Da die Beschleunigung in x-Richtung nur von der x-Koordinate abhängt und für die anderen beiden Dimensionen das Entsprechende gilt, sind die Komponenten der drei Raumdimensionen voneinander entkoppelt und können daher ohne Beachtung der beiden jeweils anderen einzeln berechnet werden.

Wenn also ein Objekt gleichzeitig in x- und in y-Richtung schwingt, verhält sich der Schattenwurf rechtwinklig zu y genau so wie eine x-Schwingung allein. Das ist ein Beispiel für etwas, das leichtsinnige Bücher als Unabhängigkeitsprinzip beschreiben, was aber eher ein Unabhängigkeits-Spezialfall ist. Im Allgemeinen bricht diese Unabhängigkeit schon durch Reibungseffekte zusammen, und im Außenraum gilt sie ohnehin nicht.

Und ewig kreist der Maulwurf

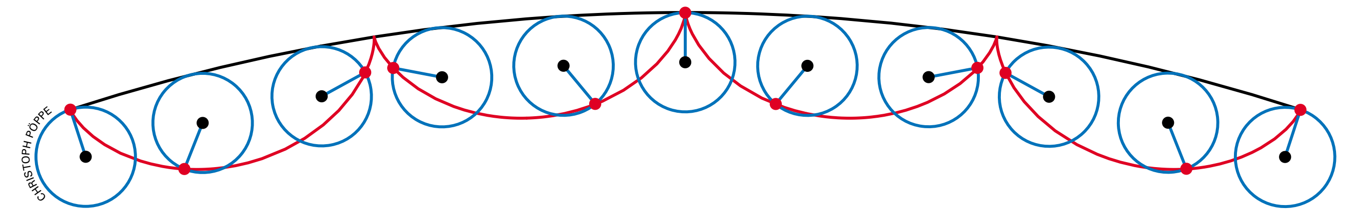
In jeder Komponente ist die Bewegung unseres Massenpunkts im harmonischen Potenzial eine Sinusschwingung; da ihre Periode für alle Startdaten und alle Komponenten dieselbe ist, überlagern sich die Schwingungen zu Ellipsenbahnen mit S als Mittelpunkt. Eine solche Ellipsenbahn kann zu einem Strich entarten – das wäre ein Teilstück eines unserer Durchmessertunnel – oder kreisrund beliebig dicht unter der Oberfläche verlaufen.

Diesen Fall kennen wir aus der Astronautik: Man geht etwas höher, um der



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

Bahnen in und um einen homogenen Planeten: rot außen oder frei in Tunneln, blau auf Schienen in Tunneln. Die Punkte zeigen Positionen der bewegten Körper im Zweiminutentakt.



▲ **Die Kurve schnellsten Falls zwischen zwei Punkten der Erdoberfläche ist gleich der Bahn eines Punktes am Rand eines Kreises, der von innen an der Oberfläche abrollt: eine Hypozykloide.**

Luftreibung aus dem Weg zu gehen, und braucht dafür keinen Tunnel. Leider halten die Fahrzeuge dabei nirgendwo an, sondern sausen mit 7,9 Kilometer pro Sekunde herum. Auf einer erdnahen Umlaufbahn kommen Sie auch in 42 Minuten zu den Antipoden und fühlen sich unterwegs »schwerelos« wie im beschriebenen Tunnel, aber Start und Landung sind jetzt wesentlich weniger komfortabel und verschwenden reichlich viel Energie, wie das bei der bemannten Raumfahrt üblich ist.

Im Außenraum ist das Potenzial nicht mehr harmonisch, sondern bekanntlich proportional zum Kehrwert des Radius, und die Bahnen sind dort Kegelschnitte, die S als einen Brennpunkt haben, wie Johannes Kepler 1609 in seiner »Astronomia Nova« – für Ellipsen – eher versteckt als veröffentlicht hat. Der Scheitelbereich einer solchen (sehr schlanken) Ellipse, die etwas aus der Erde herausragt, wird in geeigneter Näherung als Wurfparabel beschrieben. Diese hat aber fast nichts mit einer echten, das heißt durch Keplers Gesetze bestimmten, Parabelbahn zu tun, denn ihr einziger Brennpunkt liegt nahe der Oberfläche, während die echte Parabelbahn den Schwerpunkt des Planeten als Brennpunkt hat.

Im Außenraum des Planeten gelten für freie Umlaufbahnen die Kepler'schen Gesetze, gestört lediglich durch Luftreibung im oberflächennahen Bereich und durch Abweichungen von der isotropen Massenverteilung im Planeten, besonders von der Abplattung und der birnenförmigen Abweichung, nicht aber von der Konzentration der Masse im Erdkern. Im Innenraum einer homogenen Kugel mit geeigneten Tunneln haben dagegen alle Sehnen- und Ellipsenbahnen die gleiche – nur von der Dichte abhängige – Periode. Die Umlaufbahn auf der Kugeloberfläche ist der gemeinsame Grenzfall von realer Astronautik und unseren Gedankenexperimenten im Inneren.

Was machen wir bei unserem Verkehrssystem mit den Kurzstrecken, die relativ dicht unter der Oberfläche verlaufen und bei denen die Bahn nur sehr mühsam auf Touren kommt? Vielleicht lassen sich die 42 Minuten Fahrzeit ja noch unterbieten. Für die beliebte Näherung »homogenes Schwerefeld« hat Johann Bernoulli (1667–1748) im Jahr 1696 die schnellste Lösung veröffentlicht (und damit einen ganzen Zweig der Mathematik, die Variationsrechnung, begründet): Die Brachistochrone, die Kurve des schnellsten Falls, ist eine Zykloide. Das ist die Kurve, die ein Punkt am Rand eines Kreises beschreibt, der von unten an der Horizontalen durch den Startpunkt abrollt. Zwischen den Bahnhöfen hängt die schnellste Bahn also nicht nur im Potenzial durch wie unsere Sehnen in der homogenen Kugel, sondern ist auch geometrisch gekrümmt. Man fällt zunächst unter das Niveau des Zielpunkts, um Geschwindigkeit zu gewinnen, und tauscht die kinetische Energie auf der zweiten Hälfte des Wegs, wenn man allmählich ans Anhalten denken muss, wieder gegen potenzielle ein.

Regionalschnellverkehr

Für die etwas weniger kurzen Strecken – sagen wir von Europa nach Nordamerika – hat Giulio Venezian vom California Institute of Technology in Pasadena 1966 eine Lösung gefunden: Die Kurve schnellsten Falls im kugelsymmetrischen harmonischen Gravitationsfeld ist eine Hypozykloide (Bild oben). Sie wird wieder durch ein Rad mit dem Radius r erzeugt, das innen an einem Kreis mit dem Radius R abrollt. In unserem Fall ist R der Erdradius, und unser Rad rollt an der – diesmal gekrümmten – »Horizontalen« entlang, wie bei der gemeinen Zykloide, die den Grenzfall der Hypozykloide für unendlich großes R bildet. Wenn das Verhältnis $n = R/r$ rational ist, dann ist die Hypozykloide eine geschlossene Kurve und für $n = 2$ nichts anderes als ein Durchmesser des großen Kreises.

Die entlang der Erdoberfläche gemessene Entfernung s zwischen Abgangsbahnhof A und der Zielbahnhof B ist gleich dem Umfang des gedachten Kreises, der die Hypozykloidenbahn definiert; denn der rollt auf dem Weg von A nach B genau einmal ab. Der tiefste Punkt der Bahn liegt einen Kreisdurchmesser, das heißt s/π, unter dem Boden. Für eine Regionalverkehrsstrecke von 20 Kilometern wäre der Tunnel mit einer Maximaltiefe von 6336 Metern zwar ökonomischer Wahnsinn, aber technisch machbar.

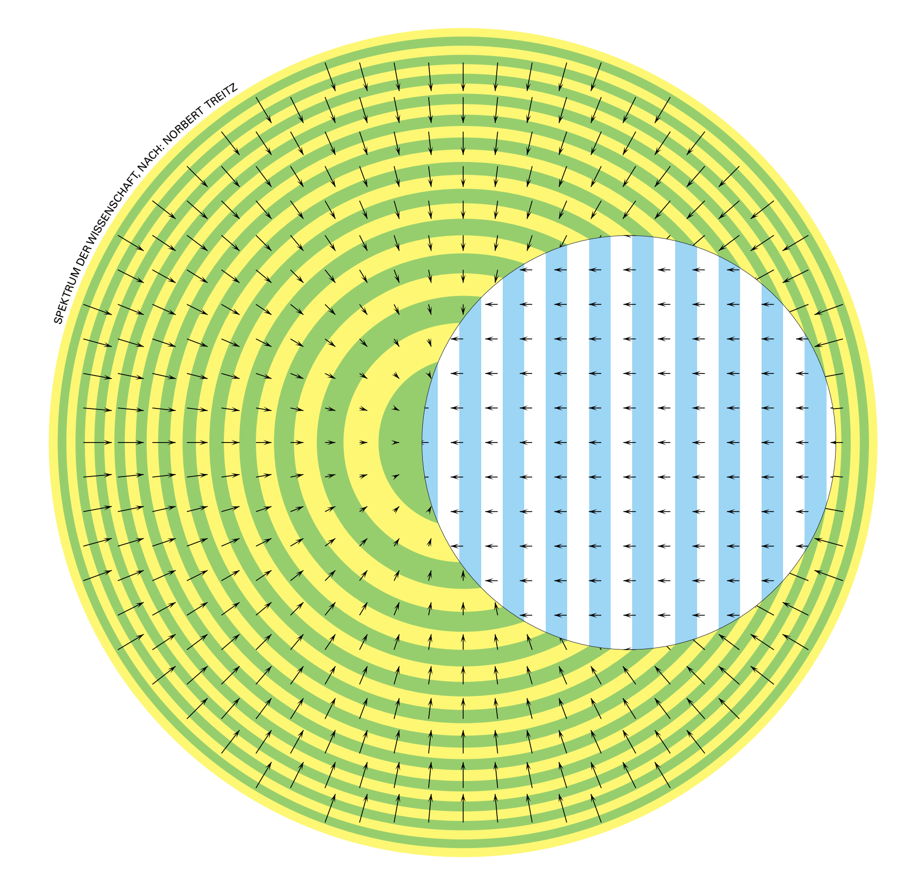
Eine sehr bescheidene Variante dieses Prinzips wird tatsächlich realisiert: Eine moderne U-Bahn lässt sich von der Erde beim Beschleunigen helfen, indem die Strecke hinter dem Bahnhof mit etwa 4 Prozent Gefälle absinkt und auf halbem Weg zum nächsten Bahnhof in eine ebenso große Steigung übergeht; das hilft beim Bremsen.

Für die Fahrzeit gilt die Gleichung $T = (2/n)\sqrt{n-1}\,T_0$, wobei T_0 = 42,2 Minuten die Fahrzeit entlang der geradlinigen Sehne ist. Für unsere Kurzstrecke, die ein Tausendstel des halben Erdumfangs beträgt, kommt man ($n = 1000$) auf eine Rekordzeit von 160 Sekunden.

Der Fahrkomfort ist frei nach Loriot als »eher sportlich« einzustufen, mit Nervenkitzel wie auf einer extremen Schiffschaukel oder beim Parabelflug: Man startet und endet im freien Fall beziehungsweise Aufstieg (»schwerelos«); aber unterwegs müssen die Schienen Wagen und Fahrgäste nicht nur daran hindern, sich dem Erdmittelpunkt noch weiter zu nähern, sondern auch der mittelpunktwärts gerichteten Komponente ihres Impulses eine geeignete Beschleunigung entgegensetzen, damit es schließlich wieder aufwärts geht. Eine nicht ganz triviale geometrische Überlegung ergibt, dass die eine Kraft genauso groß ist wie die andere. Am tiefsten Punkt der Bahn drückt »es« (was auch immer) also die Fahrgäste scheinbar mit dem doppelten – für diesen Punkt geltenden – Eigengewicht in die Polster.

Gibt es eigentlich für Sprinter oder Radsportler – analog zum Thema Rückenwind – eine Vorschrift, derzufolge die Rennstrecke nicht durchhängen darf?

Wir haben bisher so gerechnet, als ob es keine Reibung gäbe; alles pendelt im Schwerefeld, sogar übersichtlicher als ein gewöhnliches Pendel. Das scheint im Kontrast zu realen Verkehrsmitteln zu stehen, die für ihren Betrieb eine Menge schöner Energie in wertlose Formen ver- ▷



Zebrastreifen und Beschleunigungs-Vektorpfeile stellen das Potenzial in einer Ebene durch beide Mittelpunkte einer exzentrischen Hohlkugel dar. Der Hohlraum ist blau-weiß gestreift, die Restkugel mit positiver Dichte gelb-grün.

wandeln. Aber auch das liegt nur an der Reibung: Eine Magnetschwebebahn auf einem atmosphärelosen Planeten oder Satelliten bräuchte Energie nur zum erstmaligen Anschieben. Auf den Bahnhöfen speichert man sie in Federn oder Schwungscheiben oder noch einfacher dadurch, dass die Bahnhöhe auf Hügeln liegen und/oder die Strecken in Einschnitten oder Tunneln durchhängen – wenn nicht geometrisch, so doch potenzialmäßig.

Nun ist die Luftreibung schon ziemlich gravierend für den Verkehr auf der Oberfläche in der Atmosphäre. In innerirdischen Tunneln wäre sie schlicht vernichtend.

Zäh fließender Verkehr im Tunnel

Was macht das für einen Unterschied, ob in einer Röhre von wenigen Metern Durchmesser, also einem knappen Millionstel des Erdradius, die Luft steht oder nicht? Einen gewaltigen! Wir wissen aus der barometrischen Höhenformel, dass Dichte und Druck der Atmosphäre für jeweils 5,5 Kilometer Höhenunterschied nach oben ihre Werte halbieren, und zwar in der Näherung für konstante Fallbeschleunigung und überall gleiche Temperatur. Wenn dies bis zum Erdmittelpunkt eine sinnvolle Extrapolation wäre, würden Druck und Dichte bis dorthin um mehr als den Faktor $2^{1000} \approx 10^{300}$ ansteigen. Das ist zwar endlich, aber doch ziemlich gigantisch. Dass die Erdbeschleunigung in Wirklichkeit nach unten auf 0 abnimmt, schafft hierbei nur sehr mäßige Linderung. Wichtiger ist, dass die Formel nur für ideale Gase gilt, die Luft aber bei der 10^3-fachen Dichte kondensiert und dann nur noch schwach kompressibel ist. Das wäre schon in rund 100 Kilometer Tiefe der Fall, jedenfalls wenn wir statt der auch von innen geheizten Erde einen Planeten gleicher Größe mit konstanter Temperatur annehmen. In der verdichteten Luft steigt der Druck dann mit der Tiefe nicht viel anders als im Wasser oder in anderen verdichteten Materialien, also viel weniger! Das Tunnelsystem hat zwar, verglichen mit der gesamten Erde, ein geradezu lächerlich kleines Volumen. Gleichwohl kann es sein, dass sehr viel Luft hineinfällt und sich dort zusammendrückt.

Auf jeden Fall wäre die Reibung eines Fahrzeuges darin alles andere als ein Nebeneffekt: Eine Gondel würde nur langsam nach unten kriechen wie ein Löffel im Honigglas, und auf das – nun ganz wörtlich – Auftauchen am anderen Ende einer Sehnen- oder Durchmesser-Bahn würde man völlig vergebens warten, jedenfalls wenn das Fahrzeug eine größere Dichte als die kondensierte Luft hat, und im umgekehrten Fall würde es gar nicht erst weit nach unten kommen.

Man muss also das Tunnelsystem leer pumpen und wirksam vor Flutung (Belüftung) schützen. Die Fahrgäste müssen dann durch ankoppelbare Druckschleusen in die Waggons steigen.

Für einen Kleinplaneten ohne Atmosphäre könnte das Ganze aber weniger problematisch sein, und sogar die Festigkeit der Tunnelwände kann dann im Bereich technischer Möglichkeiten liegen.

Bisher war von Bahnen im Schwerefeld einer homogenen Massenverteilung die Rede. Dieses Feld selbst ist aber keineswegs homogen, oder nur in der Näherung für entsprechend kleine Raumbereiche, was aber kein Kunststück ist. Wenn unser Labor nur 10^{-n} mal so groß ist wie der Planetenradius, so ist das Schwerefeld darin auf n Dezimalstellen genau homogen: Dass es mit zunehmender Höhe schwächer wird und nach rechts und links seine Richtung ändert (weil die Richtung zum Erdmittelpunkt nicht mehr parallel zur ursprünglichen Richtung ist), macht sich erst in der n-ten Dezimalstelle bemerkbar.

Ein völlig homogenes Schwerefeld

Gesucht ist nun ein geeignet geformtes Massestück, das ein nicht nur angenähert, sondern exakt homogenes Schwerefeld erzeugt. Wohlgemerkt: Es wäre zu viel verlangt, wenn in dem entsprechenden Raumbereich ein homogenes Schwerefeld herrschen müsste; denn die übrigen Massen der Welt wirken dort auch, und diese Wirkung kann nicht abgeschirmt werden. Da hat man es mit dem elektrischen Feld leichter: Im Inneren einer metallischen Hohlkugel stellt sich ein feldfreier Raum ein, weil die Ladungen an der Kugeloberfläche sich gerade so verschieben, dass die Wirkung auswärtiger Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen kompensiert wird.

Aber Gravitationsladung gibt es nicht mit zweierlei Vorzeichen. Also wollen wir ein bereits ohnehin vorhandenes Schwerefeld vernachlässigen oder herausrechnen. Es geht darum, ein Objekt von endlicher Größe zu ersinnen, das in einem genau definierten Raumbereich mit seiner Masse dem ansonsten vorhande-

nen ein exakt homogenes Schwerefeld hinzufügt.

Dazu verwenden wir einen mathematischen Trick, der auch bei der Bestimmung von Schwerpunkten oder Trägheitsmomenten ausgehöhlter Körper gut funktioniert: Wir denken uns Objekte mit negativen Dichten, die wir anderen Objekten sozusagen in allen drei Dimensionen überlagern können. So können wir uns einen hohlen Gummiball der Wandstärke 3 mm mit dem Außenradius 30 mm als Überlagerung einer Kugel mit 30 mm Radius und passender Dichte d und einer zweiten Kugel mit Radius 27 mm und der Dichte $-d$ vorstellen.

Addieren wir nun die Schwerepotenziale für eine solche homogene konzentrische Hohlkugel, so finden wir im Überlappungsbereich von positiver und negativer Dichte, also im Hohlraum, den konstanten Wert 0. Der Gradient (also der Vektor aus den Ableitungen) und damit die Feldstärke oder Fallbeschleunigung g ist dort ebenfalls 0, die konzentrische Hohlkugel erzeugt also in ihrem Hohlraum kein Schwerefeld (vergleiche den Kasten in der Novemberausgabe).

Nun kommt der eigentliche Trick: Wir verschieben die kleinere Kugel mit der Dichte $-d$ um eine Strecke e, aber nur so weit, dass die kleinere immer noch ganz im Inneren der großen liegt, die exzentrische Hohlkugel also kein Fenster hat. Als Koordinaten-Nullpunkt verwenden wir weiterhin die Mitte der großen Kugel. Wir bekommen dann als Potenzial

$$U = D(x^2+y^2+z^2)/2 - D((x-e)^2+y^2+z^2)/2$$
$$= D\,e^2/2 + D\,e\,x$$

und als Feldstärke nur in x-Richtung eine Komponente, nämlich De, also ein homogenes Feld in der Richtung vom Mittelpunkt des Hohlraums zu dem der äußeren Kugel und proportional zu der Entfernung zwischen beiden und zur Dichte des Materials zwischen beiden Kugelflächen. (Für Einzelheiten siehe die letzte Folge; insbesondere ist $D = 4dG/3$, wobei G die allgemeine Gravitationskonstante ist.) Dieses Feld hat überall im Hohlraum die Richtung parallel zu diesem Abstand und von gleichem Betrag (Bild links), ist also wirklich homogen, und das ohne irgendeine Näherung. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

200 Puzzling Physics Problems. Von Peter Gnädig, Gyula Honyek und Ken Riley. Cambridge University Press, Cambridge 2001

Fast tunnels through the earth. Aufgabe von Tung-Po Lin und Lösung von R. C. Lyness in: American Mathematical Monthly, Bd. 76, S. 708, 1969

Through the earth in forty minutes. Von Paul W. Cooper in: American Journal of Physics, Bd. 34, Nr. 1, S. 68, 1966

Terrestrial Brachistochrone. Von Giulio Venezian in: American Journal of Physics, Bd. 34, Nr. 8, S. 701, 1966

Comments on »Through the earth in forty minutes«. Von Russell L. Mallett in: American Journal of Physics, Bd. 34, Nr. 8, S. 702, 1966

PREISRÄTSEL

Faktorenanalyse

Von Roland Mildner

Das Produkt $P = a \cdot b \cdot c$ aus einer ein-, einer zwei- und einer dreistelligen natürlichen Zahl bestehe nur aus lauter Ziffern 3.

Welche drei Faktoren kann dieses Produkt haben, und wie viele Möglichkeiten gibt es dafür?

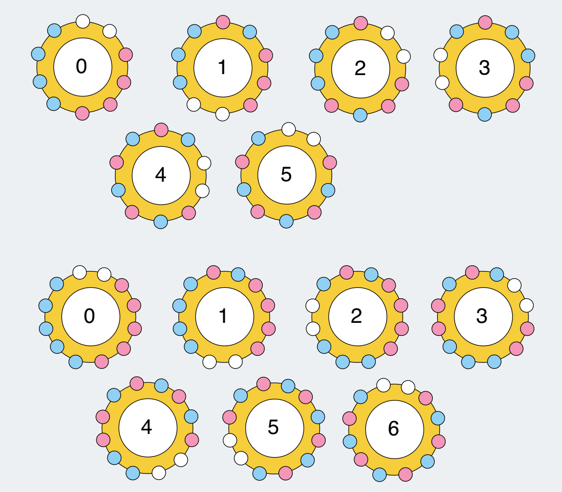
Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Taschenmesser »Rally«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. 12. 2005, eingehen.

Lösung zu »Am runden Tisch« (Oktober 2005)

Bei zweimal vier Gästen sind fünf Bewegungen notwendig, bei zweimal fünf Gästen sind es sechs. Die abgebildete Lösung von Norbert Krämer aus Mannheim ist eine von mehreren möglichen.

Die Gewinner der fünf Blechschilder »Kamel« sind Berthold Hajen, Boppard; Klaus Böttcher, Buxtehude; Hartmut Riman, Augsburg; Reinhold Baake, Hagen; und Günther Schellhorn, Wolfenbüttel.



Über die Anzahl der Lösungen zum Rätsel »Patchworkfamilie« (Juni 2005) herrschte zunächst Uneinigkeit. Inzwischen sind Bernhard Marzetta aus Riehen (Schweiz), Wolfgang Meier aus Bochum und Manfred Müller-Späth aus Bietigheim nach Abgleich ihrer Computerprogramme zum gleichen Ergebnis gekommen: Es gibt 15814 Lösungen, Rotationen des ganzen Felds und Vertauschen gleich geformter, verschiedenfarbiger Steine nicht gezählt.

Zum Rätsel »Reine Zeitfrage« (September 2005) haben wir zwei Gewinner versehentlich nicht erwähnt. Es handelt sich um Rudolf Dann, Essen, und Norbert Krämer, Mannheim. Wir bitten das Versäumnis zu entschuldigen.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

nen ein exakt homogenes Schwerefeld hinzufügt.

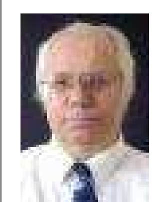
Dazu verwenden wir einen mathematischen Trick, der auch bei der Bestimmung von Schwerpunkten oder Trägheitsmomenten ausgehöhlter Körper gut funktioniert: Wir denken uns Objekte mit negativen Dichten, die wir anderen Objekten sozusagen in allen drei Dimensionen überlagern können. So können wir uns einen hohlen Gummiball der Wandstärke 3 mm mit dem Außenradius 30 mm als Überlagerung einer Kugel mit 30 mm Radius und passender Dichte d und einer zweiten Kugel mit Radius 27 mm und der Dichte $-d$ vorstellen.

Addieren wir nun die Schwerepotenziale für eine solche homogene konzentrische Hohlkugel, so finden wir im Überlappungsbereich von positiver und negativer Dichte, also im Hohlraum, den konstanten Wert 0. Der Gradient (also der Vektor aus den Ableitungen) und damit die Feldstärke oder Fallbeschleunigung g ist dort ebenfalls 0, die konzentrische Hohlkugel erzeugt also in ihrem Hohlraum kein Schwerefeld (vergleiche den Kasten in der Novemberausgabe).

Nun kommt der eigentliche Trick: Wir verschieben die kleinere Kugel mit der Dichte $-d$ um eine Strecke e, aber nur so weit, dass die kleinere immer noch ganz im Inneren der großen liegt, die exzentrische Hohlkugel also kein Fenster hat. Als Koordinaten-Nullpunkt verwenden wir weiterhin die Mitte der großen Kugel. Wir bekommen dann als Potenzial

$$U = D(x^2+y^2+z^2)/2 - D((x-e)^2+y^2+z^2)/2$$
$$= D\,e^2/2 + D\,e\,x$$

und als Feldstärke nur in x-Richtung eine Komponente, nämlich De, also ein homogenes Feld in der Richtung vom Mittelpunkt des Hohlraums zu dem der äußeren Kugel und proportional zu der Entfernung zwischen beiden und zur Dichte des Materials zwischen beiden Kugelflächen. (Für Einzelheiten siehe die letzte Folge; insbesondere ist $D = 4dG/3$, wobei G die allgemeine Gravitationskonstante ist.) Dieses Feld hat überall im Hohlraum die Richtung parallel zu diesem Abstand und von gleichem Betrag (Bild links), ist also wirklich homogen, und das ohne irgendeine Näherung. ◁



Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche und möglichst freihändige Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er nicht nur für die Ausbildung von Physiklehrkräften, sondern auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

200 Puzzling Physics Problems. Von Peter Gnädig, Gyula Honyek und Ken Riley. Cambridge University Press, Cambridge 2001

Fast tunnels through the earth. Aufgabe von Tung-Po Lin und Lösung von R. C. Lyness in: American Mathematical Monthly, Bd. 76, S. 708, 1969

Through the earth in forty minutes. Von Paul W. Cooper in: American Journal of Physics, Bd. 34, Nr. 1, S. 68, 1966

Terrestrial Brachistochrone. Von Giulio Venezian in: American Journal of Physics, Bd. 34, Nr. 8, S. 701, 1966

Comments on »Through the earth in forty minutes«. Von Russell L. Mallett in: American Journal of Physics, Bd. 34, Nr. 8, S. 702, 1966

PREISRÄTSEL

Faktorenanalyse

Von Roland Mildner

Das Produkt $P = a \cdot b \cdot c$ aus einer ein-, einer zwei- und einer dreistelligen natürlichen Zahl bestehe nur aus lauter Ziffern 3.

Welche drei Faktoren kann dieses Produkt haben, und wie viele Möglichkeiten gibt es dafür?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

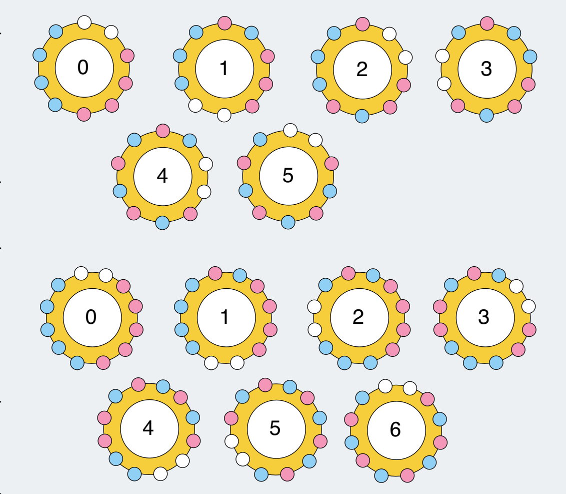
Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Taschenmesser »Rally«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 13. 12. 2005, eingehen.

Lösung zu »Am runden Tisch« (Oktober 2005)

Bei zweimal vier Gästen sind fünf Bewegungen notwendig, bei zweimal fünf Gästen sind es sechs. Die abgebildete Lösung von Norbert Krämer aus Mannheim ist eine von mehreren möglichen.

Die Gewinner der fünf Blechschilder »Kamel« sind Berthold Hajen, Boppard; Klaus Böttcher, Buxtehude; Hartmut Riman, Augsburg; Reinhold Baake, Hagen; und Günther Schellhorn, Wolfenbüttel.

Über die Anzahl der Lösungen zum Rätsel »Patchworkfamilie« (Juni 2005) herrschte zunächst Uneinigkeit. Inzwischen sind Bernhard Marzetta aus Riehen (Schweiz), Wolfgang Meier aus Bochum und Manfred Müller-Späth aus Bietigheim nach Abgleich ihrer Computerprogramme zum gleichen Ergebnis gekommen: Es gibt 15814 Lösungen, Rotationen des ganzen Felds und Vertauschen gleich geformter, verschiedenfarbiger Steine nicht gezählt.



Zum Rätsel »Reine Zeitfrage« (September 2005) haben wir zwei Gewinner versehentlich nicht erwähnt. Es handelt sich um Rudolf Dann, Essen, und Norbert Krämer, Mannheim. Wir bitten das Versäumnis zu entschuldigen.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Gerüchte und Vehler

Über das Laster, beim Programmieren (etwa eines Gerüchtemodells) Fehler zu machen, und was man daraus lernen kann

Von Brian Hayes

Der »bekennende Essay« ist in der Mathematik oder anderen Wissenschaften kein verbreitetes Genre. Nur wenige von uns mögen sich zu ihren Fehlern bekennen oder sie ins Rampenlicht rücken. Eine rühmliche Ausnahme bildet Donald E. Knuth von der Universität Stanford. Während seiner zehnjährigen Arbeit am Schriftsatzprogramm Tex hat der heute emeritierte Professor akribisch genau alle seine Fehler aufgezeichnet und die Liste dann mit detaillierten Kommentaren veröffentlicht.

Ich hab Knuths Mut zur öffentlichen Fehlerbeichte bewundert – und möchte seinem Beispiel hier folgen. Dabei hoffte ich, »Don« Knuth sogar auf diesem Gebiet zu übertrumpfen: Ich könne noch mehr Fehler machen als er. Leider fiel ich auch darin hinter ihn zurück. Knuths publizierte Fehlerliste umfasst 900 Einträge, während ich nur eine beschämende Hand voll Fehler vorweisen kann. Er benötigte allerdings zehn Jahre Arbeit, um diese hohe Zahl zu erreichen.

Knuth merkt an, dass ihm die Liste nicht nur bei der Beseitigung von Bugs, also Programmierfehlern geholfen hat, sondern auch dabei, sich »selbst besser kennen zu lernen«. Auch ich glaube, durch Erfahrung und Konfrontation mit meiner eigenen Fehlbarkeit einiges an Selbsterkenntnis hinzugewonnen zu haben. Und es wäre erfreulich, wenn ich davon ausgehen könnte, andere durch meine Ausführungen davor zu bewahren, die gleichen Fehler zu begehen. Tatsächlich jedoch mag ich nicht so recht daran glauben – und womöglich ist es nicht einmal eine gute Idee.

Die Geschichte beginnt mit einigen Anekdoten anlässlich der Recherche zu meinem Artikel über die Lambert-W-Funktion. Ich suchte nach einer Studie mit dem kuriosen Titel »Gerüchte mit allgemeinen Anfangsbedingungen«, verfasst von Selma Belen und C. E. M. Pearce von der University of Adelaide (Australien) und publiziert im Journal »Anziam« (siehe Literaturhinweise). Als ich das Paper endlich aufgetrieben hatte, war mein Artikel bereits im Druck. Dies war sehr schade, denn Belen und Pearce beschreiben eine aufschlussreiche Anwendung der W-Funktion in einem Kontext, den ich sehr interessant fand. Hier der Anfang ihres Artikels:

»Die stochastische Theorie der Gerüchte – mit ihren Gruppen von Nichtwissern, Verbreitern und Unterdrückern – nahm ihren Anfang mit der Studie von Daley und Kendall. Darin wurde auch das interessanteste Ergebnis auf diesem Gebiet präsentiert: dass, wenn es anfangs nur einen Verbreiter gibt, der Anteil der Bevölkerung, die das Gerücht niemals zu Ohren bekommt, sich nahezu sicher dem Wert von 0,203188 der gesamten Bevölkerungsgröße annähert, während diese gegen unendlich geht. Dieses Ergebnis errechnet sich auch nach dem stochastischen Modell von Maki und Thompson; leider wurde der darin auf Grund eines Druckfehlers genannte Wert von 0,238 auch in weiteren darauf basierenden Publikationen zitiert.«

Der Spaß, ein Gerücht zu verbreiten

Ich war fasziniert, dass ein Gerücht, wenn es sich wieder legt, »nahezu sicher« ein Fünftel der Leute niemals erreicht hat. Warum erreicht es nicht irgendwann alle? Und diese Zahl 0,203188, mit ihren hochpräzisen sechs Nachkommastellen, wo kam *die* her?

Ich habe im Artikel genug gelesen, um die Details dieses Modells zu verstehen. Die Grundannahme ist, wie ich herausfand, dass die Verbreitung eines Gerüchts nur dann Spaß macht, wenn man es selbst kennt, die Zuhörer aber nicht. Es verschafft kein so prickelndes Gefühl, abgeschmackte News zu verkaufen. Im Sinne der obigen drei Gruppen verbreiten Leute ein Gerücht so lange, wie sie Nichtwissern begegnen, die es begierig aufnehmen. Danach werden die Verbreiter zu Unterdrückern, die das Gerücht zwar kennen, aber kein Interesse daran haben, es weiterzugeben. Die Modelle von Daley-Kendall und Maki-Thompson vereinfachen diese sozialen Prozesse. Beide gehen von einer sorgfältig »durchmischten« Bevölkerung aus, in der sich Leute stets zufällig und mit gleich bleibender Wahrscheinlich-

keit treffen. Eine weitere Vereinfachung besteht darin, dass sich nur jeweils zwei Leute treffen, niemals größere Gruppen. Diese Paar-Treffen unterliegen strikten Regeln:

- Jedes Mal, wenn ein Verbreiter auf einen Nichtwisser trifft, wird der Nichtwisser zum Verbreiter, während der ursprüngliche Verbreiter ein solcher bleibt.
- Trifft ein Verbreiter auf einen Unterdrücker, so wird der Verbreiter selbst zum Unterdrücker.
- Für den Fall, dass sich zwei Verbreiter treffen, unterscheiden sich die Modelle. In der Daley-Kendall-Variante werden beide zu Unterdrückern. Im Maki-Thomson-Modell wird einer der beiden Verbreiter zum Unterdrücker, während der andere Verbreiter bleibt.
- Alle anderen Interaktionen (Nichtwisser-Nichtwisser, Unterdrücker-Unterdrücker) haben keinen wechselseitigen Einfluss.

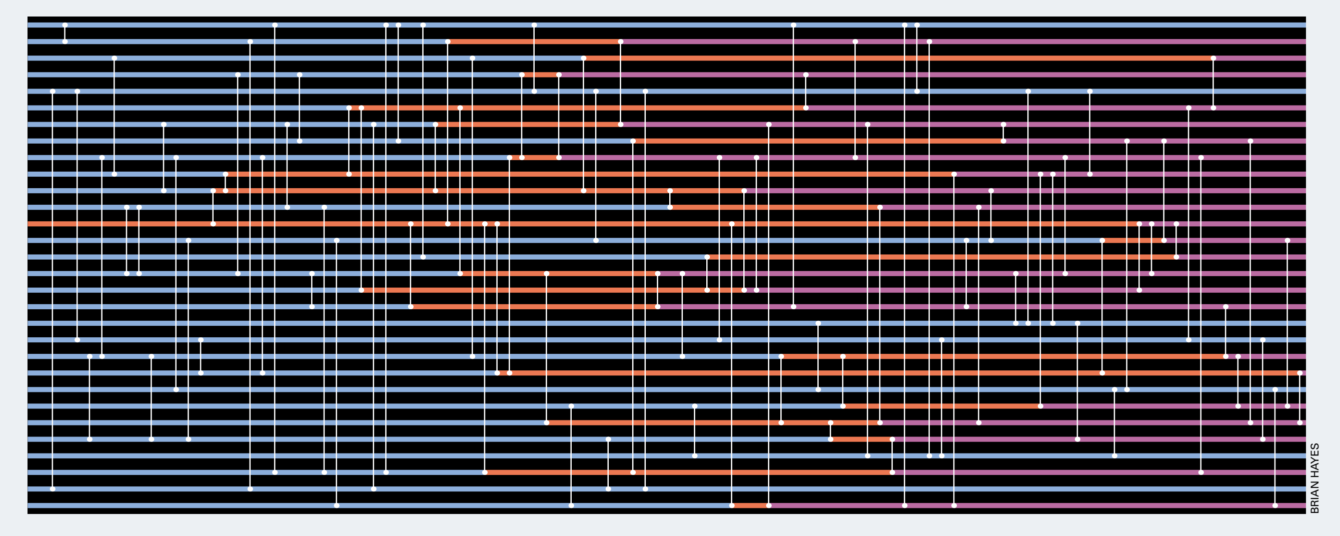
Die Modellregeln legen nahe, warum Gerüchte selbstbegrenzend wirken: Anfangs werden neue Verbreiter aus dem Riesenreservoir an Nichtwissern rekrutiert, wobei sich das Gerücht in einem Teil der Bevölkerung ausbreitet. Nimmt die Zahl der Verbreiter jedoch stark zu, treffen sie zunehmend aufeinander und werden zu Unterdrückern. Da der Übergang vom Nichtwisser zum Verbreiter und vom Verbreiter zum Unterdrücker jeweils unumkehrbar ist, ergibt sich zwangsläufig, dass das Gerücht irgendwann verebbt. Am Ende sind alle Verbreiter zu Unterdrückern geworden. Nicht ganz so klar ist, warum der letzte Verbreiter verschwindet, bevor das Reservoir an Nichtwissern gänzlich erschöpft ist – oder warum der nachhaltig nichtinformierte Anteil 0,203188 der Gesamtbevölkerung umfasst.

Wie eine ansteckende Krankheit

Gerüchtesimulationen sind stark verwandt mit Modellen nichttödlicher ansteckender Krankheiten, bei denen die drei Gruppen aus ansteckbaren, angesteckten und geheilten Fällen bestehen. Doch es gibt einen grundlegenden Unterschied zwischen Gerüchten und Epidemien: Bei den Gerüchtemodellen ist nicht nur die »Krankheit« ansteckend, sondern auch ihre »Heilung«, da sowohl die Verbreitung als auch die Unterdrückung kommunikativ übertragbar ist.

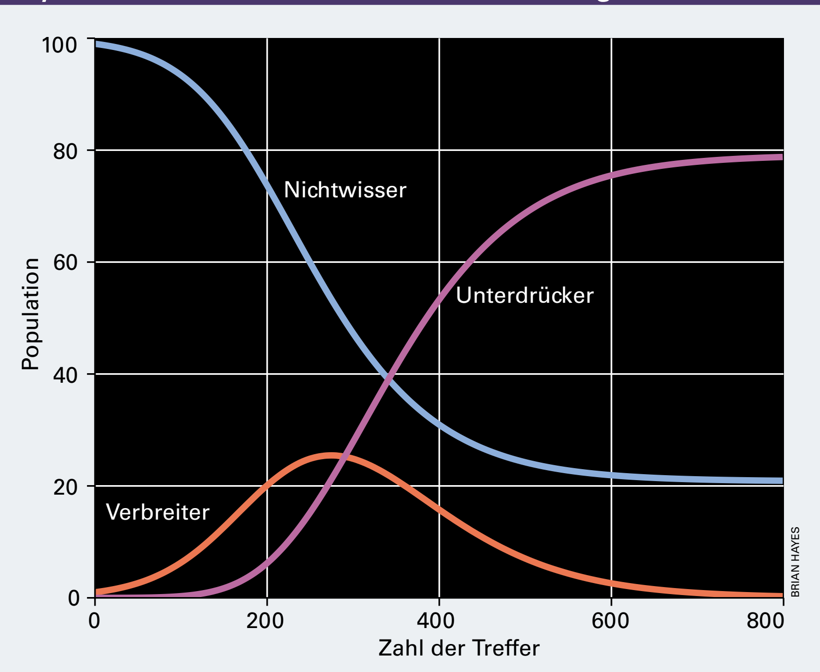
Ich war neugierig, das Gerüchtemodell in Aktion zu sehen, und schrieb daher ein kleines Computerprogramm. Dabei ging ich von einer Bevölkerung von 1000 Individuen aus, die jeweils Nichtwisser, Verbreiter oder Unterdrücker sein konnten. Am Anfang gab es nur einen Verbreiter, alle anderen waren Nichtwis- ▷

Wie entsteht ein Gerücht? Und wie verebbt es wieder?



Entstehen und Verebben eines Gerüchts sind hier vorgeführt. Von links nach rechts läuft die Zeit, jede horizontale Linie entspricht einem Mitglied der Population. Die Farben repräsentieren den Status der Person: Blau steht für *Nichtwisser*, die von dem Gerücht nichts gehört haben; Rot für *Verbreiter* des Gerüchts und Violett für *Unterdrücker*, die das Gerücht zwar kennen, aber kein Interesse daran haben, es weiterzugeben. Jede weiße vertikale Verbindung zeigt ein Treffen zwischen zwei zufällig ausgewählten Personen. Verbreiter geben das Gerücht an Nichtwisser weiter, die dadurch zu Verbreitern werden. Wenn sich zwei Verbreiter treffen, werden beide zu Unterdrückern. Ein Verbreiter, der einen Unterdrücker trifft, wird ebenfalls zum Unterdrücker. Die Verbreitung beginnt mit einem einzigen Verbreiter inmitten von Nichtwissern. Danach werden immer mehr zu Verbreitern, die schließlich alle zu Unterdrückern werden. Sieben der 30 Individuen der Gruppe hören niemals von dem Gerücht. (Alle Grafiken wurden von einem Programm erzeugt, das keinen der hier diskutierten Fehler enthält.)

Dynamik der Gerüchteverbreitung



Die Dynamik der Gerüchteverbreitung wird erkennbar, wenn man Mittelwerte aus 100 000 Programmläufen eines Modells bildet – in diesem Fall mit einer Gruppe von 100 Personen. Die Zahl der Verbreiter erreicht ein Maximum und sinkt später auf null, sodass die Gruppe schließlich nur noch aus Unterdrückern und Nichtwissern besteht. Eine grundlegende Vorhersage dieses Modells ist, dass die am Ende verbleibende Zahl von Nichtwissern etwa 0,203, also 20,3 Prozent der Gesamtgruppe umfasst.

Wiederhole
wähle ein zufälliges X aus der Menge der Verbreiter in der Bevölkerung;
wähle ein zufälliges Y aus der gesamten Bevölkerung;
wenn Y Nichtwisser ist,
dann wandle Y in einen Verbreiter um;
oder falls Y bereits ein Verbreiter ist,
dann wandle sowohl X als auch Y in einen Unterdrücker um;
oder falls Y bereits ein Unterdrücker ist,
dann wandle X in einen Unterdrücker um;
bis es keine Verbreiter mehr gibt.

▷ ser. Kern des Programms war die folgende, auf dem Daley-Kendall-Modell (bei der aufeinander treffende Verbreiter beide zu Unterdrückern werden) basierende Prozedur (siehe mein kleines Programm links unten).

Wenn es keine Verbreiter mehr gibt, kann sich nichts mehr ändern. An diesem Punkt endet das Programm und gibt Auskunft darüber, wie groß der Anteil der Bevölkerung ist, der nichts von dem Gerücht gehört hat. Dieser Anteil, Theta (griechisch: Θ) genannt, sollte 0,203188 betragen. Doch mein Programm errechnete, im Mittel bei über 1000 Durchläufen, Werte zwischen 0,28 und 0,29 – eine beträchtliche Diskrepanz.

An diesem Punkt möchte ich innehalten, um zu gestehen, dass ich Mist gebaut habe. Bevor Sie weiterlesen, könnten Sie einmal versuchen, die Bugs in meinem links stehenden Programm zu finden – oder sogar selbst ein Programm zu schreiben.

Die Programmierung von Computern lehrt – zumindest nach meiner eigenen Erfahrung – Bescheidenheit. Im Prinzip könnte die von mir beobachtete Diskrepanz auf einen Fehler in den Ergebnissen zurückführbar sein, die im Artikel publiziert sind. Dies war jedoch nicht meine erste Vermutung. Ich überprüfte meinen eigenen Programmcode – in der vollen Überzeugung, einige fahrlässige Fehler zu finden. Das Programm könnte einmal zu viel oder zu wenig die (Wiederholungs-)Schleife durchlaufen haben, dabei versagt haben, eine Variable auf den neuesten Stand zu bringen, oder einen Feldindex falsch berechnet haben. Das Problem, dachte ich, war nicht ein Tipp-, sondern ein Denkfehler.

Ich kannte eine Ungenauigkeit im Programm: Die Individuen X und Y wurden in einer Weise gewählt, dass beide dieselbe Person sein konnten – was das seltsame Szenario ergibt, dass jemand ein Gerücht an sich selbst weitergibt (»Pssst! Habe ich schon davon gehört?«). Als ich diesen Fehler beseitigt hatte, entdeckte ich einen neuen. Eine Variable namens *Verbreiterzähler* wurde bei jedem Durchlaufen der Schleife vergrößert oder verkleinert – je nach Ausgang des Treffens von X und Y. Wenn diese Variable den Wert null erreicht, endet das Programm. Nach jeder Verbreiter-Verbreiter-Interaktion zog ich die Zahl 2 von *Verbreiterzähler* ab – mit möglicherweise fatalen Folgen, falls X und Y identisch sind. Dies war ein schwer wiegender Fehler, der korrigiert werden musste. Doch als dies geschehen war, änderte sich der Wert von Θ immer noch nicht, er blieb bei 0,285.

Mir kam eine andere Idee. Belen und Pearce hatten besonders darauf hingewiesen, dass ihre Resultate nur dann gelten, wenn die Populationsgröße gegen unendlich tendiert. Vielleicht würde meine Abweichung verschwinden, wenn ich eine größere Ausgangspopulation wählte. Ich untersuchte unterschiedliche Größen und kam zu folgenden Ergebnissen (siehe Tabelle rechts oben).

Tippfehler und Denkfehler

Der Trend ist richtig: Es gab eine kleinere Zahl verbleibender Nichtwisser, wenn sich die Population vergrößerte. Doch die Kurve schien bei Werten über 1000 flach auszulaufen, und es schien unwahrscheinlich, dass Θ jemals 0,203 erreichen würde.

Dennoch fand ich es der Mühe wert, noch größere Populationen zu testen. Doch dafür benötigte ich ein schnelleres Programm. Ich schrieb eine neue, einfachere Version, in der ich auf das Feld für die Individuen verzichtete und lediglich die Zahl der Personen in jeder der drei Kategorien erfasste. Mit dieser Strategie konnte ich Populationen bis zu 100 Millionen Individuen testen. Der Wert für Θ indes blieb beharrlich bei 0,285.

Als ich die Verteilung der Θ-Werte bei einzelnen Programmläufen (im Gegensatz zum Mittelwert vieler Läufe) verfolgte, kam mir ein

anderer Gedanke. Die meisten Ergebnisse für Θ lagen zwischen 0,25 und 0,35, doch es gab einige Ausreißer, in denen 99 Prozent der Population nie von dem Gerücht hörten. Ich ahnte, was da vor sich ging. Gesetzt den Fall, dass beim ersten Kontakt X das Gerücht an Y weitergibt und beim zweiten Kontakt durch Zufall wieder dasselbe X und Y ausgewählt werden – dann würde das Gerücht bereits hier stoppen, nachdem nur zwei Leute erreicht waren. Könnte es sein, dass bei Ausschluss dieser Ausreißer der Mittelwert auf 0,203 sinkt? Ich versuchte es, doch die Antwort war Nein.

Ich war aufgeschmissen. Beim Debugging erreichte ich den Punkt, an dem man beginnt, die Funktionsfähigkeit seines Zufallszahlengenerators anzuzweifeln – oder sogar des Compilers. Zufällig hatte auch Knuth bei seiner Arbeit an Tex einige Compilerbugs gefunden. Doch diese Spur führte ins Nichts.

Alles war meine Schuld

Mangels besserer Ideen wandte ich mich dem anderen Modell der Gerüchte-Verbreitung, dem von Maki-Thompson, zu. Wie oben beschrieben, unterscheidet es sich von dem Daley-Kendall-Modell darin, dass bei einer Begegnung zwischen zwei Verbreitern lediglich einer von ihnen zum Unterdrücker wird. Die Änderung meines Programms erfolgte im Handumdrehen. Als ich es laufen ließ, lieferte es als Ergebnis Θ = 0,203. Nun war ich nicht nur aufgeschmissen, sondern auch noch ziemlich durcheinander.

Mein Bekenntnis geriet zunehmend zum Charaktertest. Es gab einen Moment – er kam in der Dunkelheit der Nacht –, in dem ich zu glauben wagte, dass vielleicht *ich* am Ende richtig lag und der Rest der Welt eine Schraube locker hatte. Ich nahm mir noch einmal den ersten Absatz der Studie von Belen und Pearce vor. Ich erkannte, dass die Sache stimmig war, und konnte die Zahlen mit meinen in Einklang bringen – freilich allein durch die Annahme, dass die australischen Autoren alles auf den Kopf gestellt haben: Die Zahl 0,203, die sie als Ergebnis für das Daley-Kendall-Modell nannten, gehört in Wahrheit zu dem von Maki-Thompson. Und die Zahl 0,238, die sie als Schreibfehler bezeichneten, war genau das: ein Zahlendreher von 0,283 – was nahe genug an 0,285 lag, dem Θ-Wert, den ich ermittelt hatte für das Daley-Kendall-Modell …

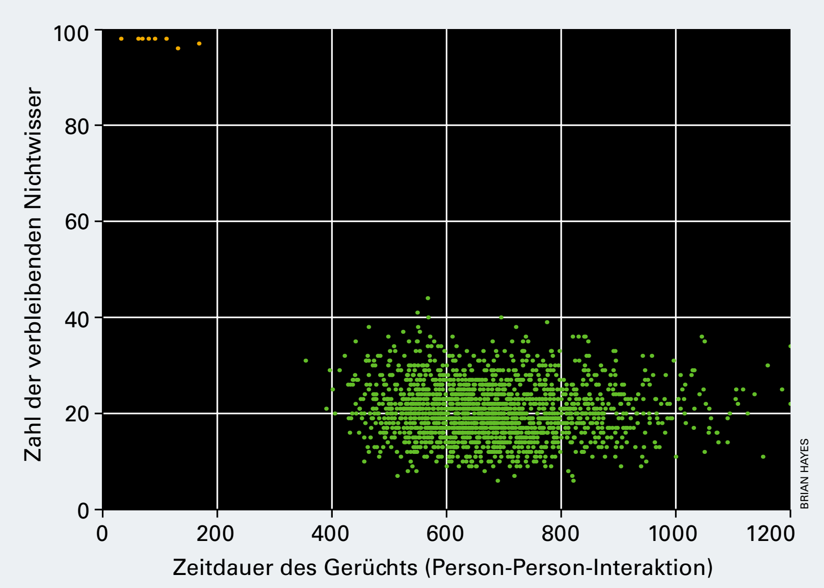
Am Morgen hatte sich der Anfall gelegt, doch es blieb ausweglos. Ich wusste, dass ich die Probleme vermutlich lösen könnte, wenn ich in die Bücherei ginge und mir die von Belen und Pearce zitierten Quellen ansähe. Doch das erschien mir zu unsportlich. Ich hätte versuchen können, die Korrektheit des einen oder anderen Ergebnisses zu beweisen. Doch wenn ich mir schon selbst nicht zutraute, eine korrektes Programm zu schreiben, wie konnte man mir dann vertrauen, dass ich einen korrekten Beweis vorlege?

Dann gab es noch die experimentelle Methode: Ich hätte tausend Freiwillige suchen, sie sorgfältig mit den Daley-Kendall-Regeln vertraut machen und inmitten von ihnen ein Gerücht ausstreuen können. Am Ende jedoch setzte ich auf eine weitere Computersimulation. Ich entschied mich, ein Programm zu schreiben, das ein reales Experiment so ähnlich wie möglich nachahmt und das alle Vorkommnisse im zu Grunde liegenden Modell ohne Vereinfachungen und Optimierungen reproduziert. Im Kopf hatte ich dabei eine Gruppe von Leuten, die wie Moleküle eines Gases umherirren, zufällig aufeinander stoßen und bei diesen Zufallskollisionen das Gerücht weitergeben. Ein solches System wollte ich simulieren.

Mein erstes Programm, das explizit jedes Mitglied der Gruppe berücksichtigte, kam dem Ziel schon recht nahe. Ich musste jedoch eine Veränderung zur Erhöhung der Recheneffizienz vornehmen: Da Interaktionen, in denen keiner der beiden Partner ein Ver- ▷

Bevölkerung	Θ
10	0,354
100	0,296
1000	0,286
10 000	0,285
100 000	0,285

Wie lange lebt ein Gerücht?



Die Lebensdauer eines Gerüchts und sein Reichweiten-Erfolg innerhalb der Gruppe sind nicht stark miteinander korreliert. Jeder Punkt entspricht einem einzelnen Lauf des Gerüchteprogramms. Die Punkte zeigen, wie lange das Gerücht lebt und wie viele Personen am Ende Nichtwisser bleiben. Der Anteil an Nichtwissern ist weit gehend unabhängig davon, ob das Gerücht nach 500 Programmläufen oder erst nach über 1000 abklingt. In der oberen linken Ecke finden sich einige Ausnahmen (orange gekennzeichnet), in denen Gerüchte bereits am Anfang verebben und nur sehr wenige Leute erreichen.

Begegnungen in der Gerüchteküche

	Nw	V	U
Nw	Nw ← Nw V ← V U ← U	Nw ← Nw – 1 V ← V + 1 U ← U	Nw ← Nw V ← V U ← U
V	Nw ← Nw – 1 V ← V + 1 U ← U	Nw ← Nw V ← V – 2 U ← U + 2	Nw ← Nw V ← V – 1 U ← U + 1
U	Nw ← Nw V ← V U ← U	Nw ← Nw V ← V – 1 U ← U + 1	Nw ← Nw V ← V U ← U

BRIAN HAYES

Alle im Gerüchtemodell möglichen Begegnungen sind in dieser Matrix zusammengefasst. Man kann damit auch die Wahrscheinlichkeit der Treffen bestimmen. Wenn Länge und Breite der Reihen und Spalten proportional zur Zahl der Mitglieder in den jeweiligen Untergruppen gewählt werden (Nichtwisser (Nw), Verbreiter (V) und Unterdrücker (U)), dann entspricht die zufällige Wahl von zwei Individuen der Wahl eines zufälligen Punkts im Diagramm. Je nachdem, in welchem der neun Kästen der gewählte Punkt liegt, entscheidet sich, was als Nächstes geschieht. Die drei Zuordnungsbedingungen innerhalb jeder Box (der Pfeil steht für »wird«) bewirken Veränderungen in der Größe der Untergruppen. Zwei der neun Kästen repräsentieren Nichtwisser-Verbreiter-Interaktionen; zwei weitere stehen für Verbreiter-Unterdrücker-Interaktionen; für Verbreiter-Verbreiter-Begegnungen gibt es nur einen einzigen Kasten.

▷ breiter war, die Gerüchteverbreitung nicht beeinflussen, schien es mir verschwenderisch, sie mitberechnen zu lassen. Ich vermied diese Verschwendung, indem ich immer einen Verbreiter als ersten Partner einer Begegnung wählte. Dies erschien mir ein völlig harmloser Eingriff zur Effizienzsteigerung zu sein.

Doch dann nahm ich den Eingiff wieder zurück. In einer dritten Programmvariante wählte ich zufällig zwei Individuen aus der gesamten Gruppe aus, prüfte, ob es sich nicht um ein und dieselbe Person handelte, und ließ sie dann gemäß den Daley-Kendall-Regeln interagieren. Es schien, so dachte ich, ein sinnloses Unterfangen zu sein, und dabei würde sicherlich genau das Gleiche herauskommen wie bei den Läufen der anderen Programme, nur nach mehr Rechenzeit. Zu meinem Erstaunen errechnete das neue Programmen einen Θ-Wert von 0,203.Wenn Sie bereits ahnen, an welchem Punkt mein Verstand auf Abwege geriet, möchte ich Ihnen gratulieren.

Meine eigene Erleuchtung setzte ein, als ich mir alle neun Begegnungsmöglichkeiten zwischen Nichtwissern, Verbreitern und Unterdrückern klar machte.

Aus der Matrix (links) lässt sich fast alles erkennen. Sie offenbart die gesamte Struktur und Funktion des Modells. Wenn man die Breiten und Längen der Spalten und Reihen so wählt, dass sie proportional zur Größe der drei Untergruppen sind, gibt die Fläche jeder der neun Kästen die Wahrscheinlichkeit der jeweiligen Paar-Begegnung wieder. Wählt man zwei Personen zufällig, so ist dies äquivalent dazu, einen beliebigen Punkt in dem Diagramm zu wählen. Das Ergebnis der Interaktion ist dann davon abhängig, in welchem der neun Kästen der gewählte Punkt liegt. (Ich übergehe wieder das – eine kleine Korrektur erfordernde – Problem, das entsteht, wenn eine Person ein Gerücht sich selbst erzählt.)

Zwischen Verbreitern und Nichtwissern

Um zu verstehen, wo mein Fehler lag, reicht es, den einfachsten Fall zu betrachten. Darin sind alle drei Untergruppen gleich groß und alle neun Begegnungsvarianten haben dieselbe Wahrscheinlichkeit – nämlich 1/9. Die Kästen an den vier Ecken des Diagramms entsprechen Situationen, in denen keiner der Beteiligten ein Verbreiter ist und die den Gerüchtestatus somit nicht beeinflussen. Zwei weitere Kästen entsprechen Nichtwisser-Verbreiter-Treffen, die daher eine Wahrscheinlichkeit von 2/9 aufweisen. Zwei weitere Kästen stehen für Verbreiter-Unterdrücker-Begegnungen, die ebenfalls mit einer Wahrscheinlichkeit von 2/9 eintreten. Es gibt jedoch nur eine einzige Box, in der Verbreiter auf Verbreiter stoßen, was daher mit einer Wahrscheinlichkeit von 1/9 geschieht. Das Entscheidende ist, dass Nichtwisser-Verbreiter-Begegnungen und Verbreiter-Unterdrücker-Begegnungen jeweils doppelt so wahrscheinlich sind wie Verbreiter-Verbreiter-Treffen.

Betrachten wir nun, was in meinem ersten Programm für das Daley-Kendall-Modell geschah. Dadurch, dass ich immer einen Verbreiter als Ausgangspunkt wählte, beschränkte ich mich auf Begegnungen in der mittleren Reihe des Diagramms, und diese drei Kästen wurden mit jeweils gleicher Wahrscheinlichkeit gewählt. Dadurch ergaben sich Verbreiter-Verbreiter-Treffen doppelt so häufig, wie es ihnen zustand, und die Gerüchteküche hörte vorzeitig auf zu brodeln.

Aus der Sicht der Wahrscheinlichkeitstheorie handelt es sich um einen grundlegenden Irrtum; die Fälle wurden nicht richtig gezählt. Ein professioneller Programmierer würde einen anderen Fehlergrund nennen. Ich hatte

gegen das altbewährte Motto verstoßen: »Beginne nicht mit der Optimierung eines Programms, ehe du es zu Ende geschrieben hast.«

Doch auch nachdem ich diesen Fehler erkannt hatte, blieb ich weiterhin verwirrt. Ausgerechnet der Algorithmus, von dem ich jetzt wusste, dass er für das Daley-Kendall-Modell nicht richtig war, lieferte das korrekte Ergebnis für das Maki-Thompson-Modell. Um das Rätsel zu lösen, machte ich mich nun schließlich auf den Weg in die Bibliothek. Ich wollte herauszufinden, was die Originalautoren tatsächlich geschrieben hatten.

Daley und Kendall sind Daryl J. Daley, derzeit an der Australian National University, und David G. Kendall, ein renommierter Statistiker und Wahrscheinlichkeitstheoretiker an der Cambridge University in England. Ihr 1965 publizierter Artikel ist ein Meisterstück klarer Darstellung, der mir all mein Stochern im Dunkeln erspart hätte – und daher bin ich froh, ihn nicht früher gefunden zu haben. Die Wahrscheinlichkeitsberechnungen erfolgten sehr sorgfältig (es findet sich ein Faktor 1/2 bei der Verbreiter-Verbreiter-Interaktion). Weiterhin gibt es eine Herleitung der mysteriös präzisen Zahl 0,203188.

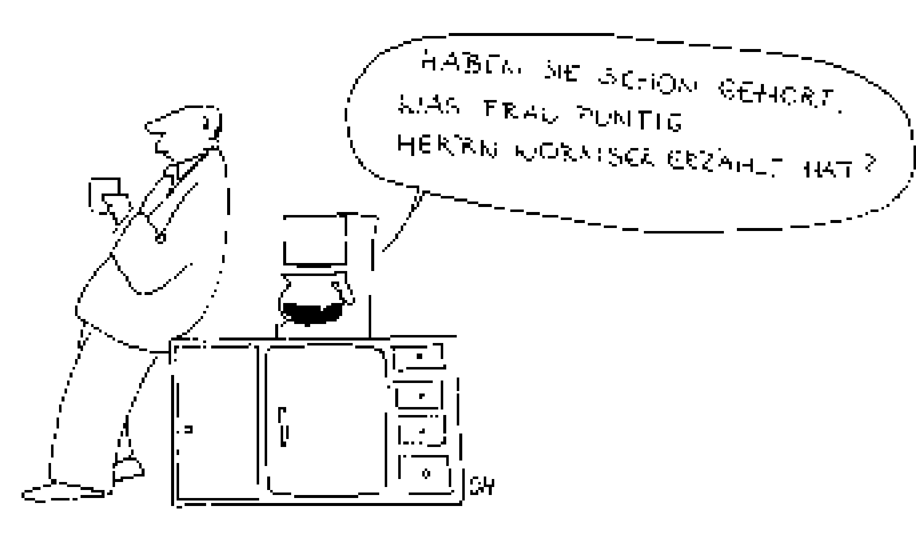
Fehler führen zur Selbsterkenntnis

Die sechsstellige Genauigkeit stammt nicht aus der Simulation tatsächlicher Fälle – wie jene, die ich selbst mit einer anderen, auf kontinuierlichen Differenzialgleichungen basierenden Version des Modells entwickelt hatte. Die Zahl Θ ist vielmehr eine Lösung der Gleichung

$$\Theta\, e^{2(1-\Theta)} = 1.$$

(Diese Gleichung erinnert an die Lambert-W-Funktion, We^{w}.) Maki und Thompson sind Daniel P. Maki und Maynard Thompson von der Indiana University. Gerüchteverbreitung haben sie 1973 in ihrem Lehrbuch »Mathematical Models and Applications« abgehandelt. Sie beschreiben den Gerüchte-Transferprozess als Telefongespräch, wobei sie sich auf Anrufe von Verbreitern beschränken. Wegen dieser Asymmetrie fließt nur die mittlere Reihe des Diagramms links oben in ihre Berechnungen ein – und mein erstes Programm war in der Tat eine korrekte Implementierung dieses Modells. (So hab ich wenigstens *etwas* richtig hinbekommen.) Es ist mehr oder minder Zufall, dass Maki und Thompson den gleichen Wert für Θ ermittelten wie Daley und Kendall: Ihre Verbreiter-Verbreiter-Interaktionen sind doppelt so wahrscheinlich, wirken sich aber nur halb so stark aus.

Der Artikel von Belen und Pearce, der mich zu diesen Ausführungen veranlasst hat, verdient ebenfalls weitere Kommentare: Der



Ausdruck »generelle Anfangsbedingungen« im Titel bezieht sich auf Gerüchte, die nicht von einem einzigen, sondern von einer Vielzahl von Verbreitern gestreut werden. Man ist versucht zu glauben, dass das Gerücht bei einer hinreichenden Zahl von Verbreitern die gesamte Gesellschaft erreichen muss. Belen und Pearce zeigen jedoch, dass dies nicht so ist. Sie ermittelten den Anteil der ursprünglichen Nichtwisser, die auch nach Verbreitung des Gerüchts Nichtwisser geblieben sind, und stellten fest, dass dieser Anteil mit der Anzahl der anfänglichen Gerüchteverbreiter ansteigt. Das Maximum beträgt 1/e, also rund 0,368. Mit anderen Worten: Je mehr Leute die Nachricht verbreiten, desto mehr Leute gibt es, die sie nicht mitbekommen. Der Grund ist einfach: Die hohe Zahl von Verbreitern führt dazu, dass diese sich schnell gegenseitig unterdrücken.

Auf dem Gebiet der mathematischen Modellierung von Gerüchten sind inzwischen zahlreiche Studien erschienen – mit unterschiedlichen Ansätzen. Ich hatte bislang noch keine Gelegenheit, in diesen Modellen etwaigen Fehlern nachzuspüren.

Fehler führen zur Selbsterkenntnis – was nicht immer willkommen ist. Doch für die meisten von uns besteht die einzige Möglichkeit, uns nie zu irren, darin, nie irgendetwas zu versuchen. Henry Petroski hat sehr eloquent über die notwendige Rolle von Fehlern und vom Scheitern geschrieben. In seinen Worten ist das Fallen ein Teil des Wachsens. Wenn wir Fehler machen, scheint es zweckdienlich, sie an die Öffentlichkeit zu bringen und ihre Ursachen zu diskutieren. Sie wirken dann weniger demütigend.

Allerdings nur ein wenig. Für solche Bekenntnisse gibt es keinen Sündenerlass. Statt »Gehe und irre dich nicht mehr« zitiert Knuth den Ratschlag des dänischen Aphorismendichters Piet Hein: »Irre dich immer wieder, aber jedes Mal ein bisschen weniger.« Ich ziehe ein anderes Motto vor. Es stammt von Samuel Beckett: »Scheitere wieder. Scheitere besser.« ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Brian Hayes ist Mathematiker und Senior Writer des American Scientist (bhayes@amsci.org).

Rumours with general initial conditions. Von Selma Belen und C. E. M. Pearce in: Anziam (The Australia and New Zealand Industrial and Applied Mathematics Journal), Bd. 45, S. 393, 2004

The errors of Tex. Software-practice & experience. Von Donald E. Knuth. Bd. 19, S. 607, 1989. Mit Ergänzungen nachgedruckt in: Literate Programming, Stanford, Kalifornien: Center for the Study of Language and Information, S. 243, 1992

Mathematical models and applications, with emphasis on the social, life, and management sciences. Von Daniel P. Maki und Maynard Thompson. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1973

Stochastic rumours. Von D. J. Daley und D. G. Kendall in: Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications, Bd. 1, S. 42, 1965

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

IM JANUAR-HEFT 2006 AB 20. DEZEMBER AM KIOSK

Grippepandemie – sind wir gewappnet?

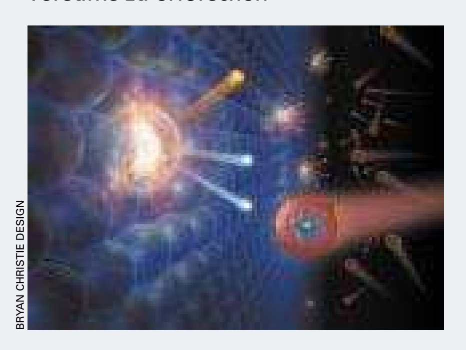
Die derzeitige Vogelgrippewelle mit dem gefährlichen Erreger vom Typ H5N1 droht auf den Menschen überzuspringen. Was können und müssen wir jetzt tun, um im Ernstfall Millionen Leben zu retten?

FOTOMONTAGE: JASON J. COOK; JUNGE MIT MASKE (MITTE) UND ARZT MIT RÖNTGENAUFNAHME (LINKS UNTEN): GETTYIMAGES / AFP, HOANG DINH NAM; SEM-VIRUS (LINKS OBEN): PHOTO RESEARCHERS INC / NIBSC; MONITOR MIT SCAN (RECHTS MITTE): EPA, BYUN YOUNG-WOOK; TAMIFLU: EPA, JUAN VRIJDAG

WEITERE THEMEN IM JANUAR

Künstliche Antimaterie

Physiker fabrizieren komplette Wasserstoffatome aus Antiteilchen, um grundlegende Symmetrien des Universums zu erforschen



BRYAN CHRISTIE DESIGN

Der Mensch, Version 2.0

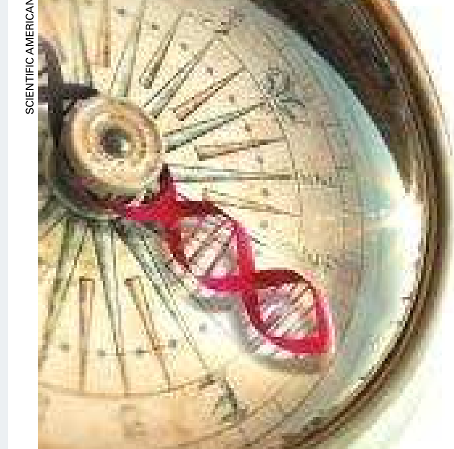
Der Futurologe Ray Kurzweil prognostiziert, dass sich in 20 Jahren der Mensch biologisch verändert haben wird – biotechnologisch



FOTO: BILL PROUD; BEARBEITUNG: SLIMFILMS

Archäologie und Klimawandel

Warum gingen die Maya zu Grunde? Was erzwang den Exodus der Anasazi? Wieso musste Han-China seine nördlichen Gebiete aufgeben? Naturwissenschaftler entdecken Spuren katastrophaler Dürren im Altertum



SCIENTIFIC AMERICAN INDIA

Gründermutationen

Vermischten sich unsere Vorfahren mit anderen Menschenarten? Wann und wo entstanden bestimmte Erbkrankheiten? Eine spezielle Klasse von Mutationen gibt Antwort auf Fragen wie diese